

DOI: 10.15393/j2.art.2020.5362

УДК 674.81

Статья

Исследование влияния температуры мёрзлого почвогрунта на его свойства

Рудов Сергей Евгеньевич

кандидат технических наук, старший преподаватель, Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С. М. Будённого (Российская Федерация), 89213093250@mail.ru

Куницкая Ольга Анатольевна

доктор технических наук, профессор, Арктический государственный агротехнологический университет (Российская Федерация), ola.ola@mail.ru

Григорьев Игорь Владиславович

доктор технических наук, профессор, Арктический государственный агротехнологический университет (Российская Федерация), silver73@inboxl.ru

Получена: 16 сентября 2020 / Принята: 23 сентября 2020 / Опубликовано: 29 сентября 2020

Аннотация: Установление закономерностей влияния температуры мёрзлых грунтов на их физико-механические свойства позволяет произвести более точные оценки параметров процесса взаимодействия лесных машин и трелёвочных систем с массивом почвогрунта при выполнении лесосечных работ с заранее заданными статическими нагрузками. Адекватная оценка состояния краевой части мёрзлого массива почвогрунта является основой для формирования начальных условий при расчётах параметров разрушения напряжённо-деформированного мёрзлого слоя почвогрунта, процессов его уплотнения и колееобразования под действием статических нагрузок, возникающих при эксплуатации различных лесных машин и трелёвочных систем. В статье представлены методика, аппаратное обеспечение и результаты натурных экспериментальных исследований по определению влияния температуры мёрзлого почвогрунта на его прочностные и деформационные свойства, а также на процесс колееобразования при работе лесных машин на мёрзлых почвогрунтах. Для выявления закономерностей изменения температуры почвогрунта по глубине, а также с целью отбора проб почвогрунта для проведения испытаний механических свойств по глубине были вскрыты уступы грунта с площадкой 1×1 м и глубиной до 1,0 м. Исследованы срезы на трёх участках

с преобладанием: мерзлотно-палево-бурых почв с супесчаной грунтовой основой; перегнойно-карбонатных почв с суглинистой основой; криозёмных глеевых почв с глинистой основой. Измерение температуры грунта проводили вблизи поверхности уступа почвенным электронным термометром HI 98501 Hanna (Германия) с разрешением 0,1 °С и погрешностью $\pm 0,3$ °С. При помощи проникающего зонда термометра в контрольных отверстиях по глубине уступа с шагом 0,1 м измеряли значение температуры по мере увеличения глубины.

Ключевые слова: лесные почвогрунты; колееобразование; лесные машины; лесозаготовки

DOI: 10.15393/j2.art.2020.5362

Article

Study of the influence of frozen soil temperature on its properties

Sergej Rudov

PhD in engineering, senior lecturer, Military Academy of communications named after Marshal of the Soviet Union S. M. Budyonny (Russian Federation), 89213093250@mail.ru

Ol'ga Kunickaya

Doctor of engineering, Professor, Arctic state agrotechnological University (Russian Federation), ola.ola@mail.ru

Igor Grigorev

Doctor of engineering, Professor, Arctic state agrotechnological University (Russian Federation), silver73@inboxl.ru

Received: 16 September 2020 / Accepted: 23 September 2020 / Published: 29 September 2020

Abstract Establishing the regularities of the influence of frozen soil temperature on their physical and mechanical properties allows us to make more accurate estimates of the parameters of forest machines and skidding systems interaction with the soil mass when performing logging operations with pre-set static loads. An adequate assessment of the state of the marginal part of the frozen soil mass is the basis for the formation of initial conditions for calculating the parameters of destruction of the stress-strain frozen soil layer, the processes of its compaction and rutting under the influence of static loads that occur during the operation of various forest machines and skidding systems. The article presents the methodology, hardware, and results of field experimental studies to determine the effect of the temperature of frozen soil on its strength and deformation properties, as well as on the process of rutting during the operation of forest machines on frozen soils. To identify patterns of changes in soil temperature in depth, as well as for the purpose of sampling soil for testing mechanical properties in depth, soil ledges were opened with a platform of 1x1 m and a depth of up to 1.0 m. Sections were studied on three sites with a predominance of: permafrost-pale-brown soils with sandy loam soil base; humus-carbonate soils with loam base; cryosemeral gley soils with clay base. Soil temperature was measured near the surface of the ledge using a HI 98501 Hanna (Germany) electronic thermometer with a resolution of 0.1°C and an error of $\pm 0.3^\circ\text{C}$. Using a penetrating probe of the thermometer, the temperature value was measured in control holes along the depth of the ledge in increments of 0.1 m as the depth increased.

Keywords: forest soils; rutting; forest machines; logging

1. Введение

Натурные экспериментальные исследования являются одним из наиболее распространённых методов научного проникновения при изучении процессов и взаимосвязей в лесозаготовительном производстве. Это касается и исследований в области экологической эффективности лесозаготовительного производства, воздействия лесных машин на почвогрунты лесосек. Отечественными и зарубежными учёными выполнено большое количество работ в этой области, например публикации [1—16]. Но теоретическое и экспериментальное изучение взаимодействия лесных машин с почвогрунтами криолитозоны проводится участниками научной школы «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства» впервые. Ранее работ в этой области при направленном информационном поиске выявить не удалось.

В работах [17—26] выполнены теоретическое обоснование и разработка прогнозных моделей воздействия лесных машин на мерзлотные почвогрунты, а также обоснованы направления снижения негативного воздействия лесных машин на экосистему лесов криолитозоны.

Для получения материалов, позволяющих судить об адекватности выполненных теоретических исследований, были проведены натурные эксперименты.

2. Материалы и методы

Образцы почвогрунтов для исследований отобраны в условиях ГКУ РС(Я) «Колымское лесничество». Протяжённость территории лесничества с запада на восток составляет 600 км, с севера на юг — 440 км. Территория лесничества разделена на три участковых лесничества (таблица 1). Основными путями транспорта являются зимние автомобильные дороги. Из основных дорог по территории лесничества проходит одна дорога федерального значения «Колыма»: Якутск — Зырянка — Среднеколымск — Черский (автозимник).

Таблица 1. Структура Колымского лесничества

Table 1. The structure of the Kolyma forest

№ п/п	Наименование участковых лесничеств	Административный район (муниципальное образование)	Общая площадь, га
1	Верхнеколымское	Верхнеколымский	6634825
2	Черское	Нижнеколымский	1864348
3	Среднеколымское	Среднеколымский	12184757
Всего по лесничеству			20677218

В породном составе насаждений Колымского лесничества преобладает лиственница. Среднестатистическая продолжительность пожароопасного сезона составляет 110 дней.

Верхнеколымское участковое лесничество Республики Саха (Якутия) расположено в границах Верхнеколымского административного района.

Общая площадь лесхоза составляет 6634825 га. Контора находится в районном центре пос. Зырянка, расположенном на расстоянии 2440 км севернее г. Якутска на автомобильной дороге федерального значения Якутск — Магадан («Колыма»).

Лесничество граничит на западе с Момским, на севере — со Среднеколымским, на юго-восток — с Магаданским лесничествами. Юридический адрес: Верхнеколымское участковое лесничество ГКУ РС(Я) «Колымское лесничество», 678770, Верхнеколымский район, пос. Зырянка, ул. Строительная, д. 2.

Для лесничества характерен резко-континентальный климат с холодной продолжительной зимой и коротким, сравнительно тёплым летом. Колебания температуры составляют более 90 °С, а среднегодовая температура отрицательная (–11,7 °С), отсюда и повсеместное распространение вечной мерзлоты. Безморозный период составляет всего 70—80 дней, но и в это время могут быть заморозки, поэтому вегетационный период очень короток, что обуславливает замедленный рост древостоя и непредсказуемость будущего урожая.

Вечная мерзлота не только замедляет почвообразование, но и, являясь водоупором, способствует заболачиванию. Болота, мари и тундра занимают 11,4 % площади улуса. Вечная мерзлота обуславливает низкий температурный режим почв в течение вегетационного периода, что сказывается на произрастании древесной растительности.

Преобладает лиственничное редколесье. Леса из лиственницы, тополя украшены подлеском из кустарников берёзы, ивы, рябины, ольховника. В горах широко распространены заросли кедрового стланика, ивы, образующих разорванный пояс субарктических кустарников. Основные климатические данные по Верхнеколымскому лесничеству приведены в таблице 2 и на рисунке 1.

В условиях зоны многолетней мерзлоты процессы почвообразования осложняются присутствием близко залегающей многолетней мерзлоты и сезонными процессами промерзания и оттаивания.

В нашем исследовании изучены закономерности изменения температуры по глубине залегания и физико-механические свойства трёх типов почв, характерных для района проведения опытов, это мерзлотно-палево-бурые почвы; перегнойно-карбонатные почвы; криозёмы глеевые.

Палево-бурые почвы (фото 1) занимают значительную площадь северной тайги, такие почвы уникальны и встречаются лишь в Якутии. Полигоны плоские или выпуклые, имеют высоту 10—20 см, диаметр варьирует от 40—80 см до 1—2 м. Почвы оттаивают за лето на 1,0—1,5 м. Морфологический профиль отличается слабой дифференциацией на генетические горизонты с монотонной палево-коричневой окраской, но в нём заметна аккумуляция гумуса и органики. По гранулометрическому составу это супесчаные

и легкосуглинистые почвы. Основной характерной чертой является наличие ясно выраженного подвешенного, светлоокрашенного карбонатного горизонта, реже карбонаты залегают в нижней части профиля.

Таблица 2. Основные климатические данные (Верхнеколымское лесничество)

Table 2. Basic climate data (Verkhnekolymsky forestry)

Параметр	Значение
Температура воздуха наиболее холодных суток (°C) с обеспеченностью 0,98	-54
Температура воздуха наиболее холодной пятидневки (°C) с обеспеченностью 0,98	-53
Абсолютная минимальная температура воздуха, °C	-58
Среднесуточная амплитуда температуры воздуха наиболее холодного месяца, °C	8
Продолжительность (сут.) и средняя температура воздуха (°C) периода со среднесуточной температурой воздуха ≤ 0 °C	237 -23,7
Продолжительность (сут.) и средняя температура воздуха (°C) периода со среднесуточной температурой воздуха ≤ 8 °C	287 -18,9
Продолжительность (сут.) и средняя температура воздуха (°C) периода со среднесуточной температурой воздуха ≤ 10 °C	301 -17,5
Климатические данные тёплого периода года	
Барометрическое давление, гПа	1010
Температура воздуха (°C) с обеспеченностью 0,95	16,6
Температура воздуха (°C) с обеспеченностью 0,98	23
Средняя максимальная температура воздуха наиболее тёплого месяца, °C	19
Абсолютная максимальная температура воздуха, °C	+36
Среднесуточная амплитуда температуры воздуха наиболее тёплого месяца, °C	10,4
Суточный максимум осадков, мм	45

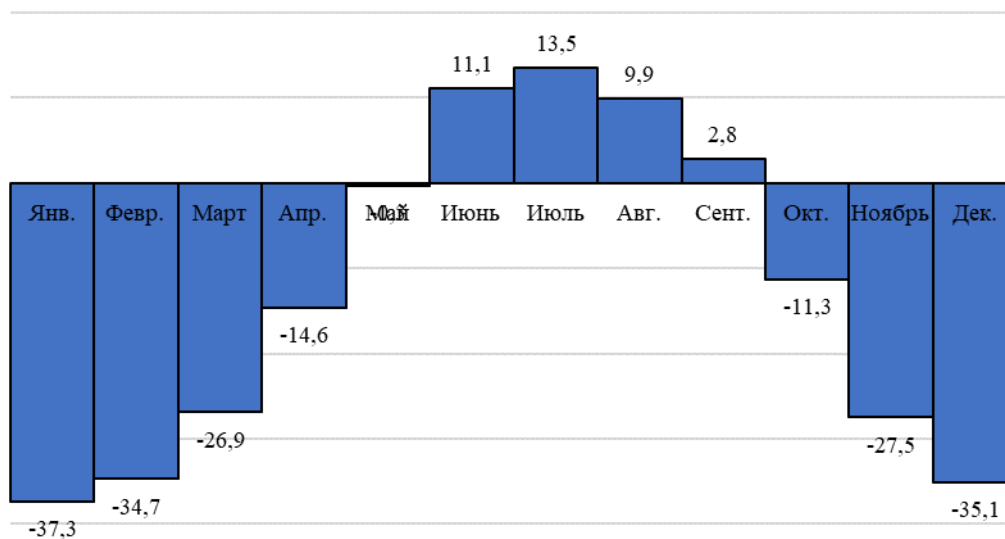


Рисунок 1. Среднемесячная температура воздуха, °С

Figure 1. Monthly air temperature, °C



Фото 1. Срез мерзлотной палево-буровой почвы

Photo 1. Section of permafrost pale-brown soil

Перегноино-карбонатные почвы (фото 2) формируются по высоким частям водоразделов в автоморфных условиях на элювии карбонатных пород под листовенничными редколесьями в условиях хорошего внутрипочвенного дренажа. Профиль этих почв характеризуется сильной мерзлотной деструктивностью, слабой оглеенностью и карбонатностью всей минеральной части. Глубина сезонного протаивания до 70—80 см. По гранулометрическому составу это средне- и тяжелосуглинистые почвы, они имеют равномерное распределение илистых частиц по всему профилю. Почвы содержат в верхних горизонтах большое количество грубого перегноя, потеря при прокаливании составляет до 40—70 %. Содержание гумуса довольно высокое по всему профилю: 6—10 % в верхних и 2—4 % в нижних горизонтах.



Фото 2. Срез перегноино-карбонатной почвы

Photo 2. Section of humus-carbonate soil

Криозёмные глеевые почвы (фото 3), как правило, характерны для равнинных территорий, где они формируются в условиях затруднённого дренажа (застойного увлажнения) на породах суглинистого и глинистого механического состава при постоянном присутствии в почвенном профиле мерзлотного льдистого горизонта на небольшой глубине. Профиль их состоит из влажной подстилки из опада хвои, листьев, лишайников и мхов. Горизонт рыхлый, побуревший, ниже расположен тёмно-бурый органогенный горизонт небольшой мощности, оторфованный или торфянисто-перегноинный, затем в надмерзлотном горизонте следует минеральная часть в той или иной степени оглеения.



Фото 3. Срез криозёмной глеевой почвы

Photo 3. Cross-section of cryozem gley soil

Для выявления закономерностей изменения температуры почвогрунта по глубине, а также с целью отбора проб почвогрунта для проведения испытаний механических свойств по глубине были вскрыты уступы грунта с площадкой 1×1 м и глубиной до 1,0 м.

Исследованы срезы на трёх участках с преобладанием:

- мерзлотно-палево-бурых почв с супесчаной грунтовой основой (экспериментальные срезы № 1—3);
- перегнойно-карбонатных почв с суглинистой основой (экспериментальные срезы № 4—6);
- криозёмных глеевых почв с глинистой основой (экспериментальные срезы № 7—9).

Измерение температуры грунта проводили вблизи поверхности уступа почвенным электронным термометром HI 98501 Hanna (Германия) с разрешением $0,1$ °C и погрешностью $\pm 0,3$ °C.

Далее, при помощи проникающего зонда термометра в контрольных отверстиях по глубине уступа с шагом $0,1$ м замерыли значение температуры T по мере увеличения глубины z . При фиксированном значении h величину T измеряли до 10 раз. В таблицах 3—5 представлены средние значения температуры почвогрунта в контрольных точках.

Таблица 3. Результаты измерения температуры грунта по глубине массива (экспериментальные срезы № 1—3, мерзлотно-палево-бурая почва с супесчаной грунтовой основой)

Table 3. Results of measuring the soil temperature at the depth of the massif (experimental sections No. 1—3, permafrost-pale-brown soil with sandy loam soil base)

z, м	№ 1		№ 2		№ 3	
	T	S	T	S	T	S
0,0	0,49	0,05676	-0,10	0	-0,61	0,08756
0,1	0,36	0,05164	-0,23	0,0483	-1,23	0,09487
0,2	0,20	0	-0,40	0,04714	-1,26	0,09661
0,3	0,05	0,0527	-1,06	0,1075	-1,40	0,18856
0,4	-0,10	0	-1,15	0,09718	-1,57	0,13375
0,5	-0,25	0,0527	-1,27	0,11595	-1,67	0,22632
0,6	-0,39	0,03162	-1,29	0,09944	-1,76	0,06992
0,7	-0,60	0,04714	-1,47	0,14181	-1,74	0,20111
0,8	-1,13	0,1567	-1,66	0,18974	-1,89	0,17288
0,9	-1,39	0,1792	-1,67	0,11595	-2,00	0,15635
1,0	-1,33	0,1567	-1,69	0,09944	-2,03	0,24518

Примечание: здесь и далее *S* — стандартное выборочное отклонение экспериментальной величины.

3. Результаты

Результаты замеров для срезов мерзлотно-палево-бурой почвы с супесчаной грунтовой основой проиллюстрированы графиками на рисунках 2—6.

Анализ полученных данных показывает, что температура мёрзлой и оттаивающей мерзлотно-палево-бурой почвы с супесчаной грунтовой основой изменяется по глубине в соответствии с квадратичным законом, причём согласование экспериментальных данных с результатами аппроксимации весьма высокое ($R^2 > 0,9$). Установлено качественное и количественное согласование теоретической оценки функции относительного изменения температуры почвогрунта по глубине, полученное в теоретической части работы, с опытными данными, расхождение находится в пределах доверительных границ варьирования экспериментальной величины и не превышает 30 %.

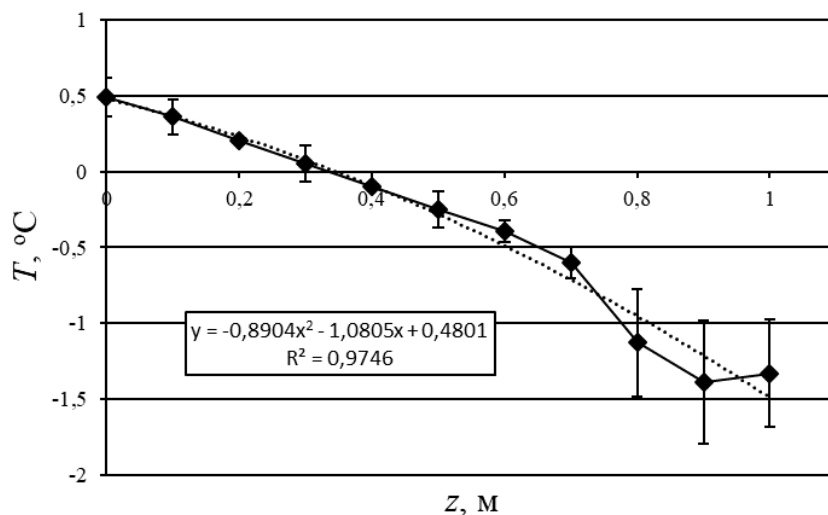


Рисунок 2. Изменение температуры грунта по глубине массива (экспериментальный срез № 1)

Figure 2. Change in soil temperature over the depth of the massif (experimental section No. 1)

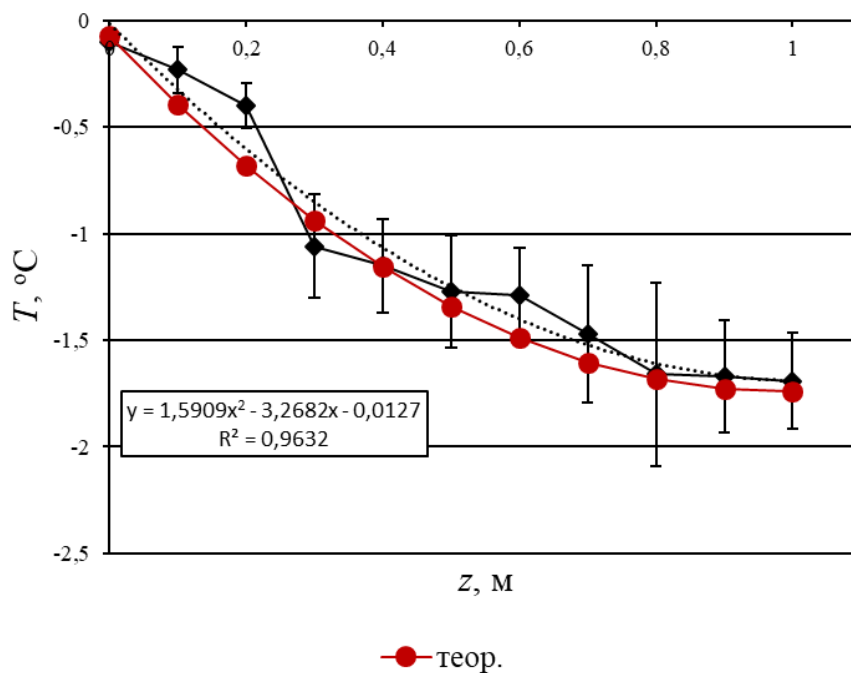


Рисунок 3. Изменение температуры грунта по глубине массива (экспериментальный срез № 2)

Figure 3. Change in soil temperature over the depth of the massif (experimental section No. 2)

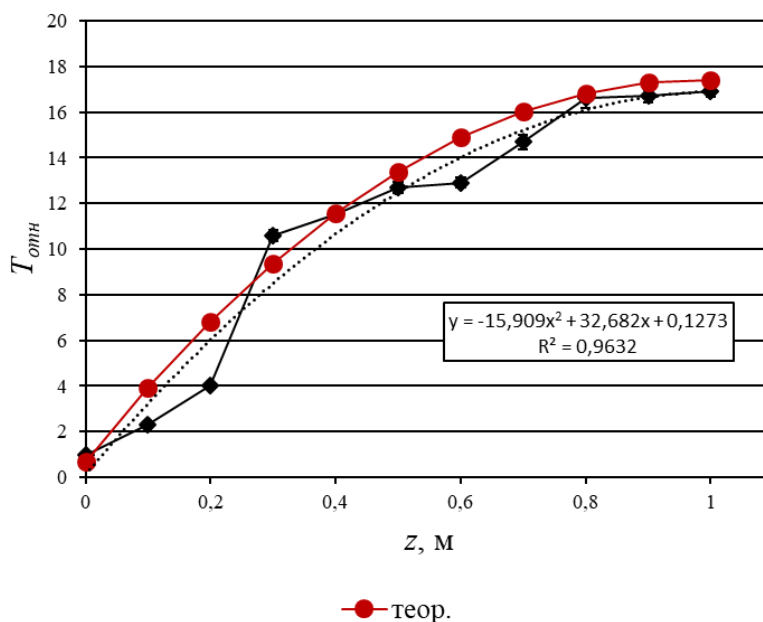


Рисунок 4. Относительное изменение температуры грунта по глубине массива (экспериментальный срез № 2)

Figure 4. Relative change in soil temperature over the depth of the massif (experimental section No. 2)

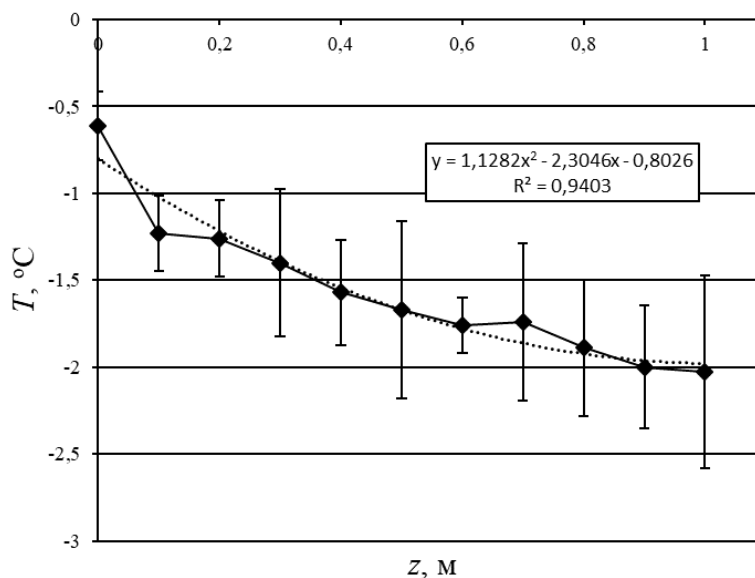


Рисунок 5. Изменение температуры грунта по глубине массива (экспериментальный срез № 3)

Figure 5. Change in soil temperature along the depth of the massif (experimental section No. 3)

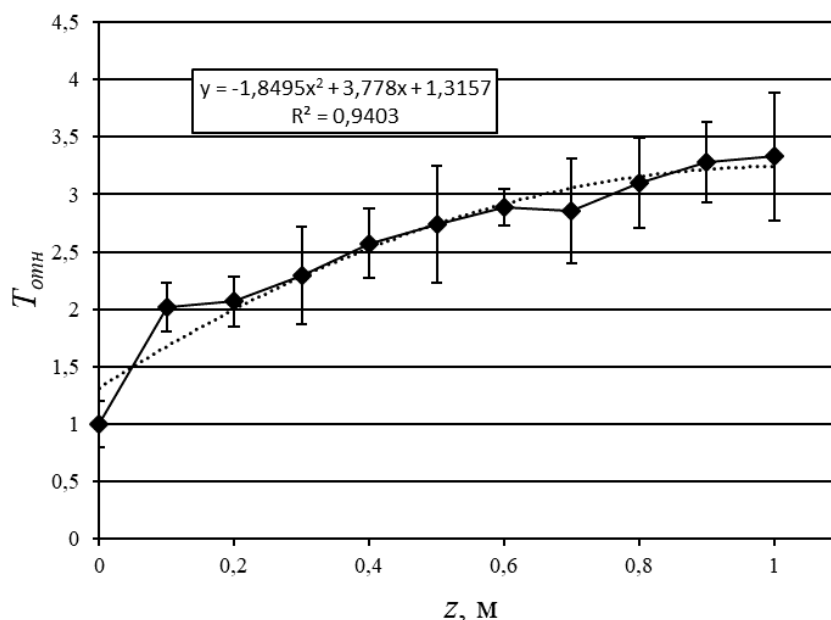


Рисунок 6. Относительное изменение температуры грунта по глубине массива (экспериментальный срез № 3)

Figure 6. Relative change in soil temperature over the depth of the massif (experimental section No. 3)

Результаты измерения температуры срезов перегнойно-карбонатного почвогрунта с суглинистой основой представлены в таблице 4 и на рисунках 7—11.

Как и в предыдущем случае, анализ полученных данных показывает, что температура мёрзлого и оттаивающего перегнойно-карбонатного почвогрунта с суглинистой основой изменяется по глубине в соответствии с квадратичным законом, причём согласование экспериментальных данных с результатами аппроксимации высокое ($R^2 > 0,9$).

В таблице 5 и на рисунках 12—17 приведены сведения по изменению температуры почвогрунта на срезах криозёмного глеевого почвогрунта с глинистой основой.

Основываясь на результатах анализа полученных опытных данных, отметим, что для криозёмного глеевого почвогрунта с глинистой основой изменение температуры по глубине с высокой точностью описывается квадратичной зависимостью ($R^2 > 0,9$).

Таблица 4. Результаты измерения температуры грунта по глубине массива (экспериментальные срезы № 4—6, перегнойно-карбонатный почвогрунт с суглинистой основой)

Table 4. Results of measuring the soil temperature at the depth of the massif (experimental sections No. 4—6, humus-carbonate soil with a loamy base)

z, м	№ 4		№ 5		№ 6	
	T	S	T	S	T	S
0,0	0,10	0	-0,10	0	-0,73	0,09487
0,1	-0,07	0,0483	-0,25	0,0527	-0,89	0,08756
0,2	-0,20	0	-0,41	0,03162	-1,00	0,10541
0,3	-0,38	0,04216	-0,56	0,05164	-1,75	0,24152
0,4	-0,51	0,05676	-0,71	0,05676	-1,60	0,16997
0,5	-0,68	0,09189	-0,90	0,09428	-1,78	0,19322
0,6	-0,82	0,07888	-1,02	0,11353	-1,89	0,21318
0,7	-0,96	0,1075	-1,56	0,13499	-1,98	0,21499
0,8	-1,60	0,15635	-1,66	0,18379	-1,97	0,1767
0,9	-1,76	0,19551	-1,98	0,16865	-2,26	0,15776
1,0	-1,75	0,23214	-1,93	0,14944	-2,27	0,32677

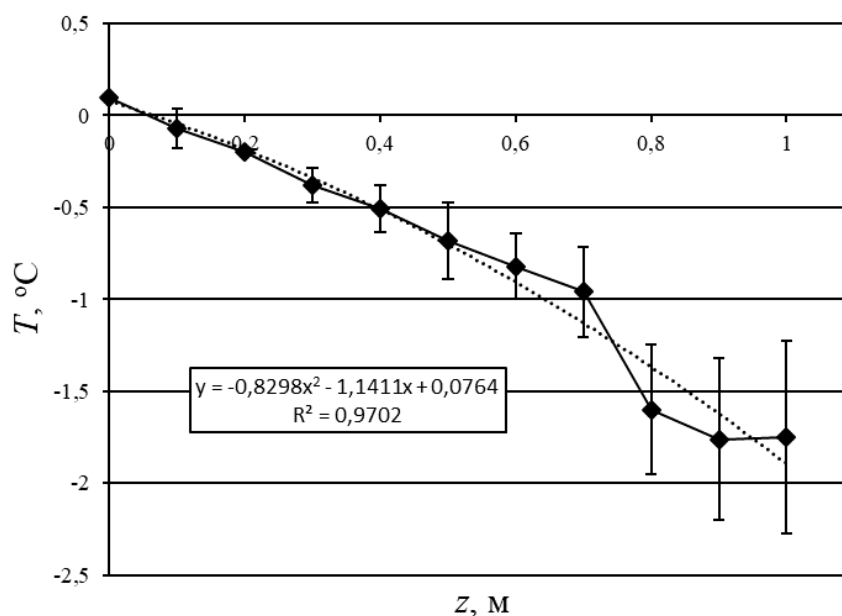


Рисунок 7. Изменение температуры грунта по глубине массива (экспериментальный срез № 4)

Figure 7. Change in soil temperature along the depth of the massif (experimental section No. 4)

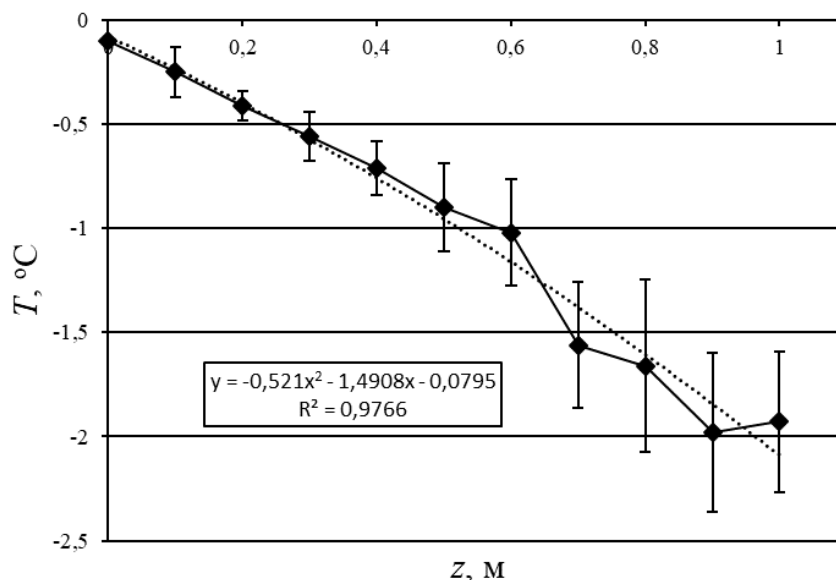


Рисунок 8. Изменение температуры грунта по глубине массива (экспериментальный срез № 5)

Figure 8. Change in soil temperature along the depth of the massif (experimental section No. 5)

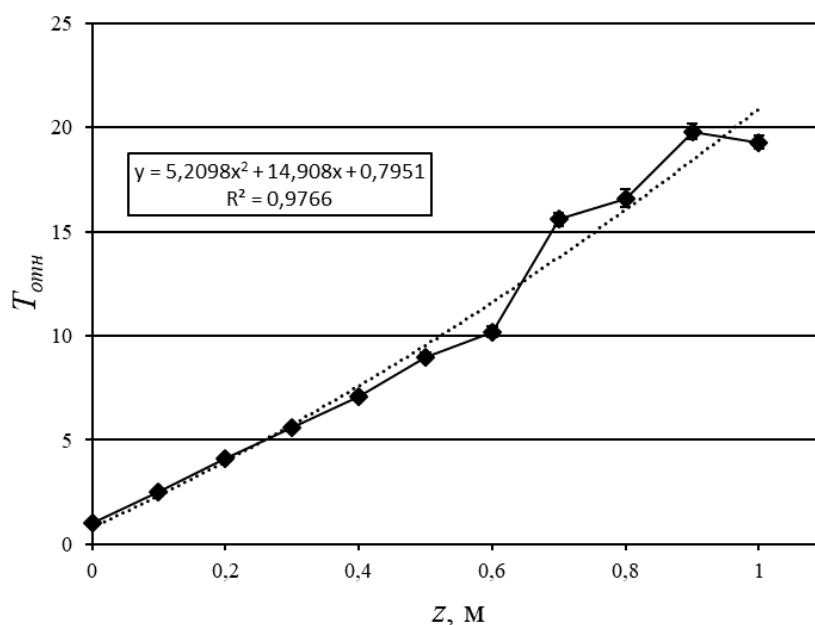


Рисунок 9. Относительное изменение температуры грунта по глубине массива (экспериментальный срез № 5)

Figure 9. Relative change in soil temperature over the depth of the massif (experimental section No. 5)

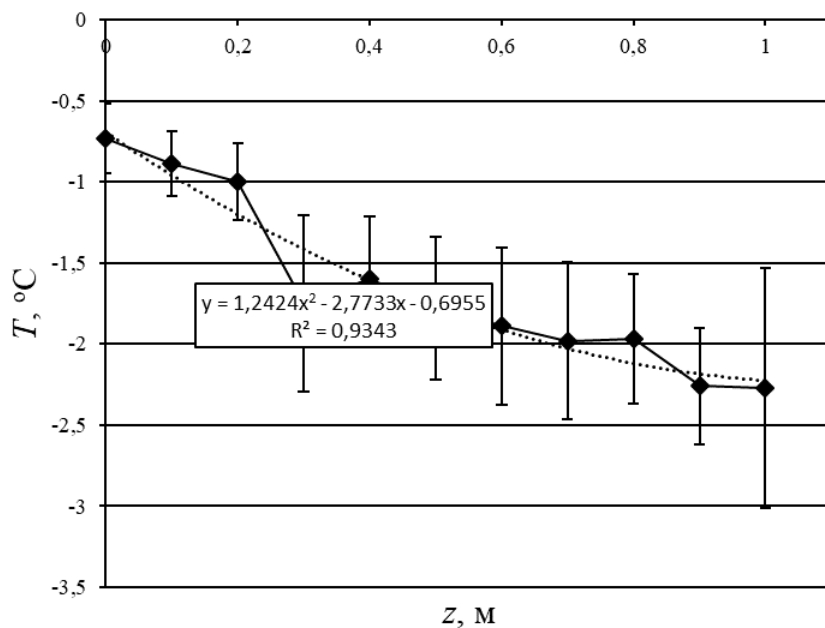


Рисунок 10. Изменение температуры грунта по глубине массива (экспериментальный срез № 6)

Figure 10. Change in soil temperature along the depth of the massif (experimental section No. 6)

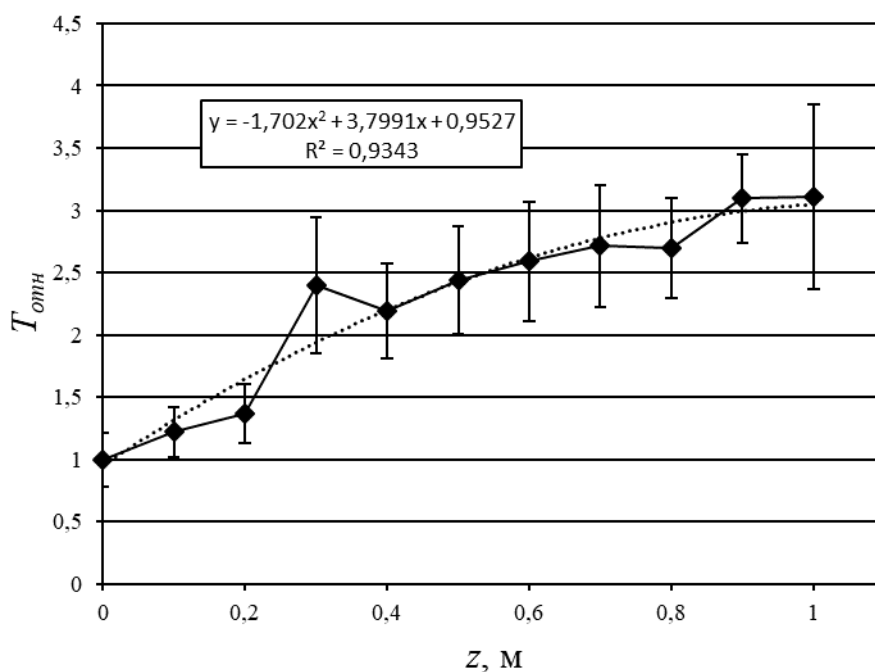


Рисунок 11. Относительное изменение температуры грунта по глубине массива (экспериментальный срез № 6)

Figure 11. Relative change in soil temperature over the depth of the massif (experimental section No. 6)

Таблица 5. Результаты измерения температуры грунта по глубине массива (экспериментальные срезы № 7—9, глина)

Table 5. Results of measuring the soil temperature at the depth of the massif (experimental sections No. 7—9, clay)

z, м	№ 7		№ 8		№ 9	
	T	S	T	S	T	S
0,0	-0,10	0	-1,06	0,11738	-1,35	0,15811
0,1	-0,26	0,05164	-1,22	0,14757	-1,49	0,15239
0,2	-0,40	0,06667	-1,30	0,1633	-1,74	0,14298
0,3	-0,53	0,06749	-1,43	0,10593	-1,79	0,11972
0,4	-0,75	0,09718	-2,12	0,2044	-1,86	0,14298
0,5	-0,84	0,08433	-2,23	0,17029	-1,89	0,21318
0,6	-1,03	0,06749	-2,32	0,16865	-2,07	0,14181
0,7	-1,23	0,19465	-2,41	0,26013	-2,17	0,1767
0,8	-1,36	0,14298	-2,62	0,32931	-2,26	0,20656
0,9	-1,44	0,15776	-2,55	0,19003	-2,41	0,25144
1,0	-2,07	0,20028	-2,61	0,33149	-2,47	0,14944

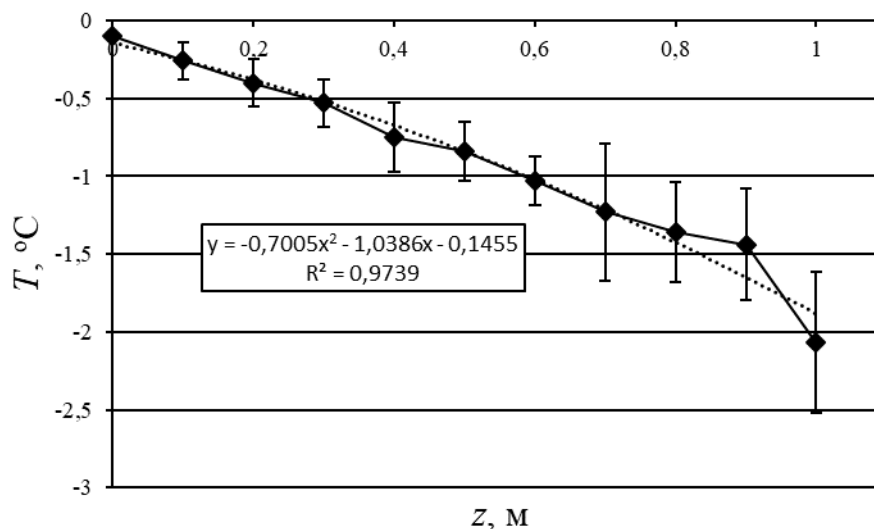


Рисунок 12. Изменение температуры грунта по глубине массива (экспериментальный срез № 7)

Figure 12. Change in soil temperature along the depth of the massif (experimental section No. 7)

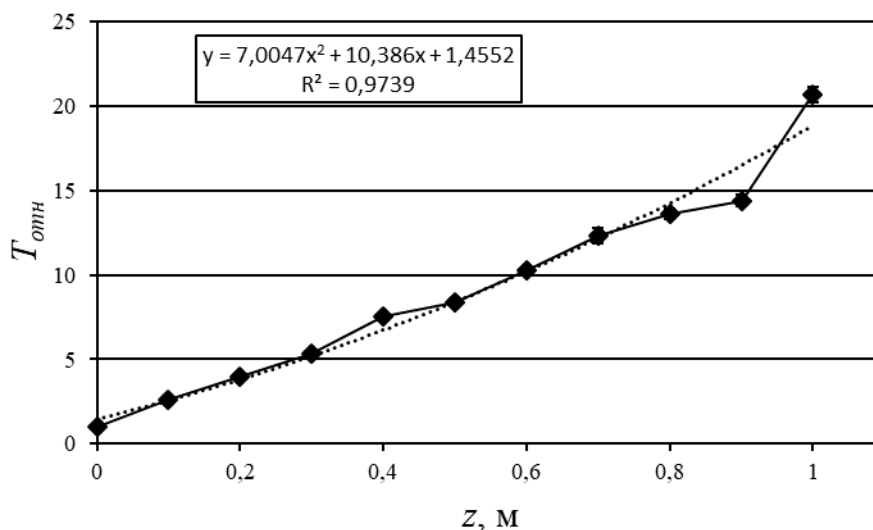


Рисунок 13. Относительное изменение температуры грунта по глубине массива (экспериментальный срез № 7)

Figure 13. Relative change in soil temperature over the depth of the massif (experimental section No. 7)

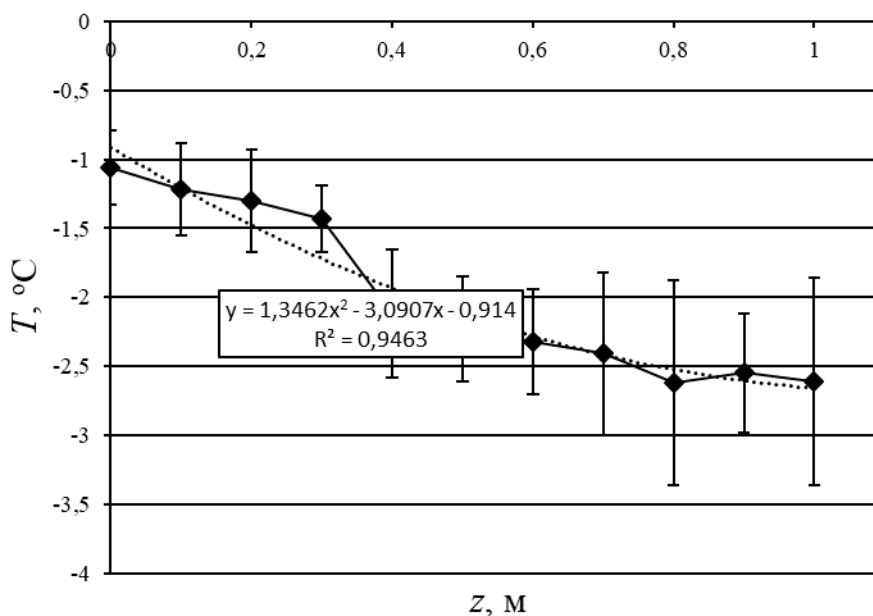


Рисунок 14. Изменение температуры грунта по глубине массива (экспериментальный срез № 8)

Figure 14. Change in soil temperature along the depth of the massif (experimental section No. 8)

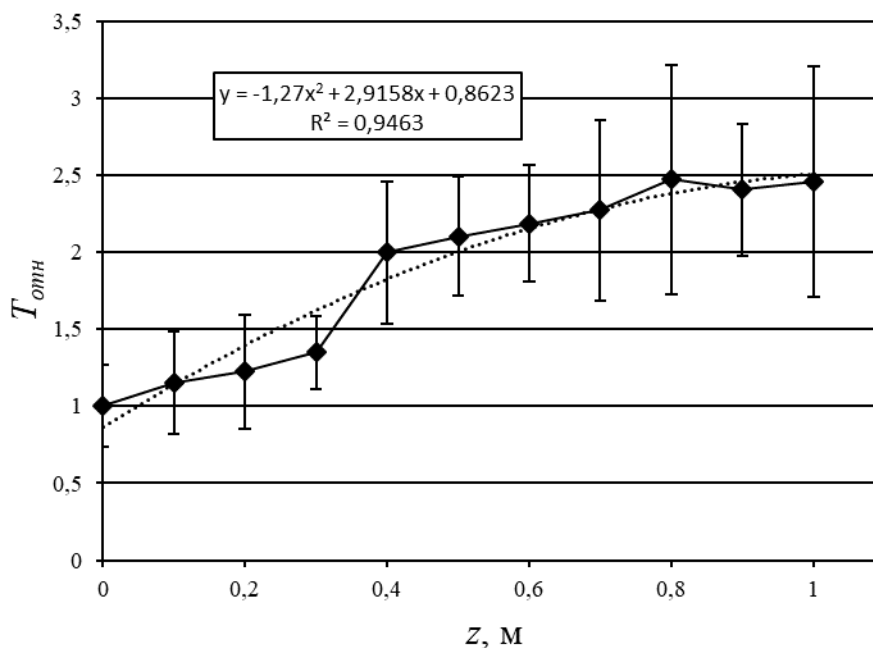


Рисунок 15. Относительное изменение температуры грунта по глубине массива (экспериментальный срез № 8)

Figure 15. Relative change in soil temperature over the depth of the massif (experimental section No. 8)

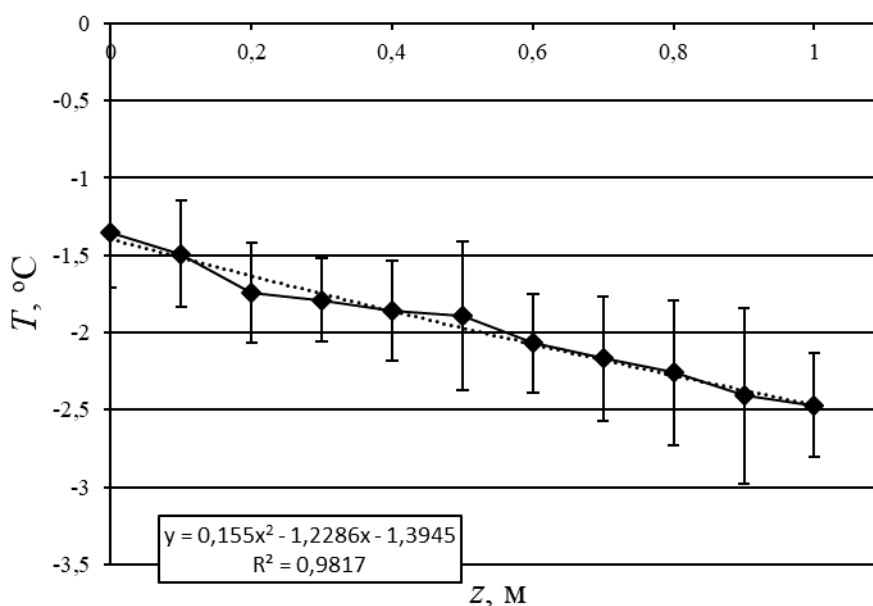


Рисунок 16. Изменение температуры грунта по глубине массива (экспериментальный срез № 9)

Figure 16. Change in soil temperature along the depth of the massif (experimental section No. 9)

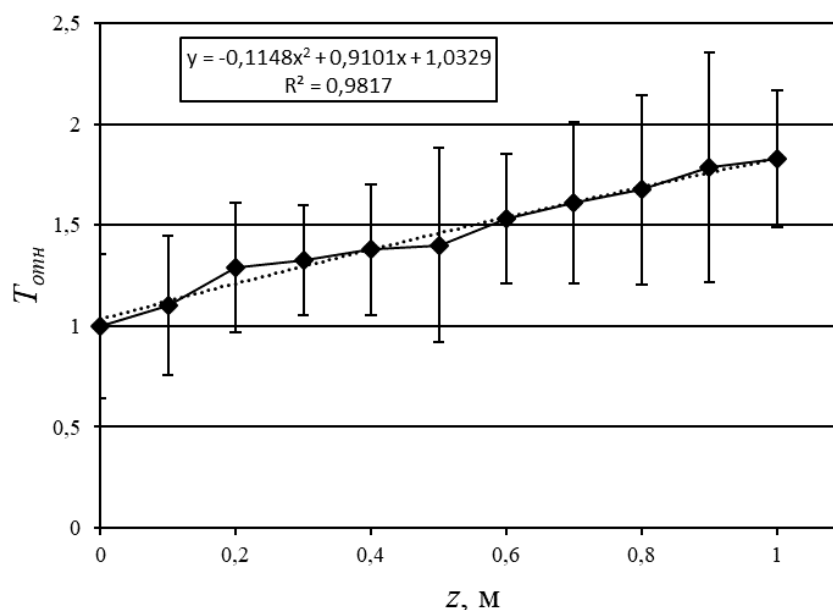


Рисунок 17. Относительное изменение температуры грунта по глубине массива (экспериментальный срез № 9)

Figure 17. Relative change in soil temperature over the depth of the massif (experimental section No. 9)

В результате исследования уступов мерзлотно-палево-бурого почвогрунта с супесчаной грунтовой основой (экспериментальные срезы № 1—3) было установлено, что температура заморзания почвогрунта составляет в среднем $-0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$. В таблице 6 и на рисунках 18, 19 приведены результаты испытаний образцов почвогрунта на сжатие при температуре вблизи границы заморзания.

В таблице 7 и на рисунках 20, 21 приведены данные по результатам испытаний того же типа почвогрунта, но при температуре $T = -1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

В таблице 8 и на рисунках 22, 23 приведены данные по результатам испытаний супесчаного почвогрунта при температуре $T = -1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

В результате исследования уступов перегнойно-карбонатного почвогрунта с суглинистой грунтовой основой (экспериментальные срезы № 4—6) было установлено, что температура заморзания почвогрунта составляет в среднем $-1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$. В таблице 9 приведены результаты испытаний образцов почвогрунта на сжатие при температуре вблизи границы заморзания.

Данные, полученные при испытании суглинистого почвогрунта при температуре $-1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, представлены в таблице 10.

В таблице 11 приведём результаты испытаний на сжатие образцов суглинистого почвогрунта при $T = -2,0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Результаты исследования прочности образцов криозёмного глеевого почвогрунта с глинистой основой (экспериментальные срезы № 7—9) при температуре $T = -1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (вблизи границы заморзания) представлены в таблице 12.

Результаты исследования прочности образцов криозёмного глеевого почвогрунта с глинистой основой (экспериментальные срезы № 7—9) при температуре $T = -2,0^{\circ}\text{C}$ представлены в таблице 13.

Результаты исследования прочности образцов криозёмного глеевого почвогрунта с глинистой основой (экспериментальные срезы № 7—9) при температуре $T = -2,5^{\circ}\text{C}$ представлены в таблице 14.

Таблица 6. Результаты испытаний мёрзлого почвогрунта на сжатие для супесчаной основы, опыт № 1 (здесь и далее M — среднее значение)

Table 6. Results of tests of frozen soil for compression for sandy loam base, experiment No. 1 (hereafter, M is the average value)

P , кН	σ , МПа	h , мкм		E , МПа	
		M	S	M	S
0,0	0,000	0,0	0,00	—	—
0,1	0,051	94,1	5,63	81,59	5,055
0,2	0,102	184,8	10,10	83,04	4,731
0,3	0,153	276,9	19,84	83,30	6,298
0,4	0,204	362,3	19,21	84,69	4,703
0,5	0,255	451,8	24,34	84,89	4,669
0,6	0,306	539,0	36,91	85,53	6,003
0,7	0,357	608,7	29,94	88,17	4,386
0,8	0,407	689,6	35,09	88,96	4,617
0,9	0,458	762,7	31,73	90,21	3,700
1,0	0,509	880,1	49,65	87,01	4,993
1,1	0,560	921,0	35,97	91,33	3,494
1,2	0,611	1029,9	43,66	89,13	3,630
1,3	0,662	1044,0	36,07	95,21	3,290
1,4	0,713	1171,2	68,59	91,61	5,331
1,5	0,764	1201,0	73,57	95,75	5,627
1,6	0,815	1242,2	81,35	98,79	6,451
1,7	0,866	1356,5	65,88	95,98	4,646
1,8	0,917	1460,9	63,05	94,33	4,115

Разрушение:

	M	S
$P_{разр}$, кН	1,87	0,0754
$\sigma_{сж,разр}$, МПа	0,953	0,0380
E , МПа	89,40	6,780

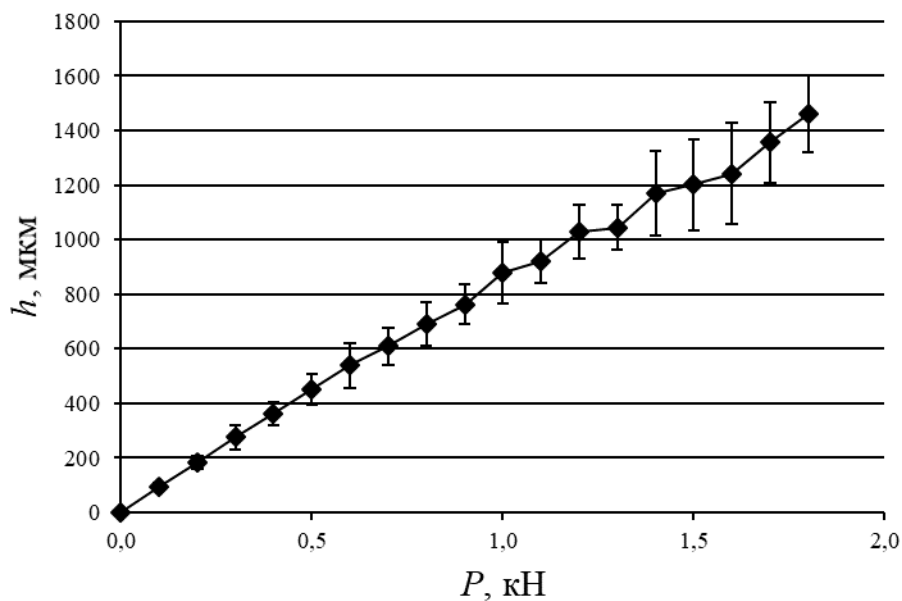


Рисунок 18. Деформация сжатия мёрзлого почвогрунта (опыт № 1, супесчаная основа, $T = -0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Figure 18. Compression deformation of frozen soil (experiment No. 1, sandy loam base, $T = -0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$)

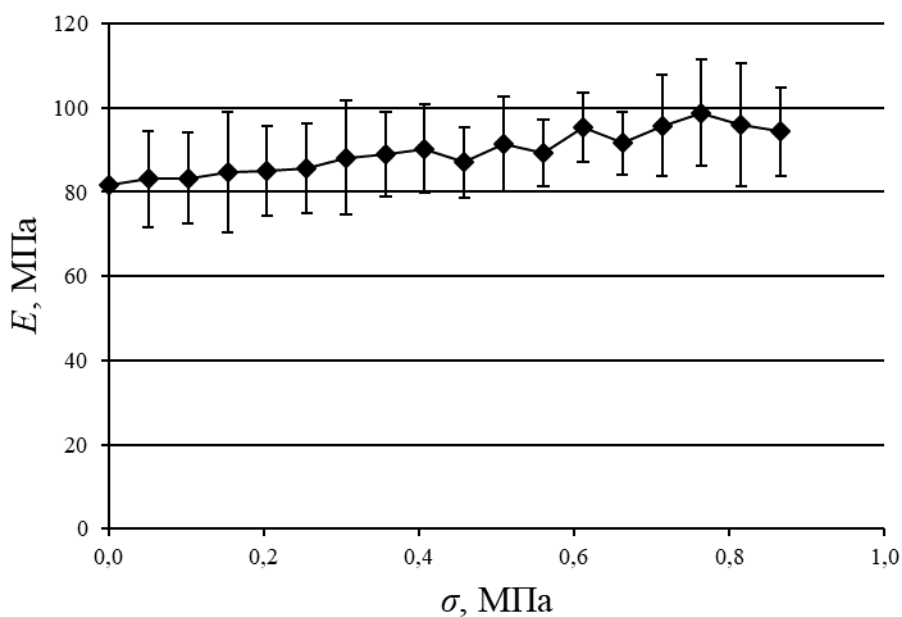


Рисунок 19. Модуль деформации мёрзлого почвогрунта (опыт № 1, супесчаная основа, $T = -0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Figure 19. Modulus of deformation of frozen soil (experiment No. 1, sandy loam base, $T = -0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Таблица 7. Результаты испытаний мёрзлого почвогрунта на сжатие (опыт № 2, супесчаная основа)

Table 7. Results of tests of frozen soil for compression (experiment No. 2, sandy loam base)

P , кН	σ , МПа	h , МКМ		E , МПа	
		M	S	M	S
0,0	0,000	0,0	0,00	—	—
0,1	0,051	63,7	3,09	120,34	5,653
0,2	0,102	123,7	5,38	123,90	5,410
0,3	0,153	182,3	9,81	126,23	6,994
0,4	0,204	242,1	11,42	126,64	5,964
0,5	0,255	301,1	18,75	127,48	7,811
0,6	0,306	361,6	28,02	127,67	10,338
0,7	0,357	421,8	13,41	127,06	4,021
0,8	0,407	469,2	25,05	130,75	6,850
0,9	0,458	533,6	28,86	129,10	7,173
1,0	0,509	581,9	22,08	131,37	4,907
1,1	0,560	637,9	31,61	131,98	6,780
1,2	0,611	674,1	38,81	136,39	8,096
1,3	0,662	724,3	31,67	137,35	6,112
1,4	0,713	790,9	25,30	135,36	4,285
1,5	0,764	846,8	42,51	135,63	6,884
1,6	0,815	882,6	42,30	138,80	7,060
1,7	0,866	920,2	44,92	141,48	7,009
1,8	0,917	997,9	52,52	138,20	7,475
1,9	0,968	1036,1	69,39	140,70	9,671
2,0	1,019	1053,3	77,92	145,85	11,105
2,1	1,070	1090,7	30,36	147,27	4,140
2,2	1,120	1131,2	35,95	148,79	4,664
2,3	1,171	1176,5	38,36	149,56	4,880
2,4	1,222	1245,9	44,80	147,41	5,325
2,5	1,273	1364,9	56,66	140,23	5,783

Разрушение:

	M	S
$P_{разр}$, кН	2,63	0,0794
$\sigma_{сж,разр}$, МПа	1,340	0,0400
E , МПа	135,40	10,480

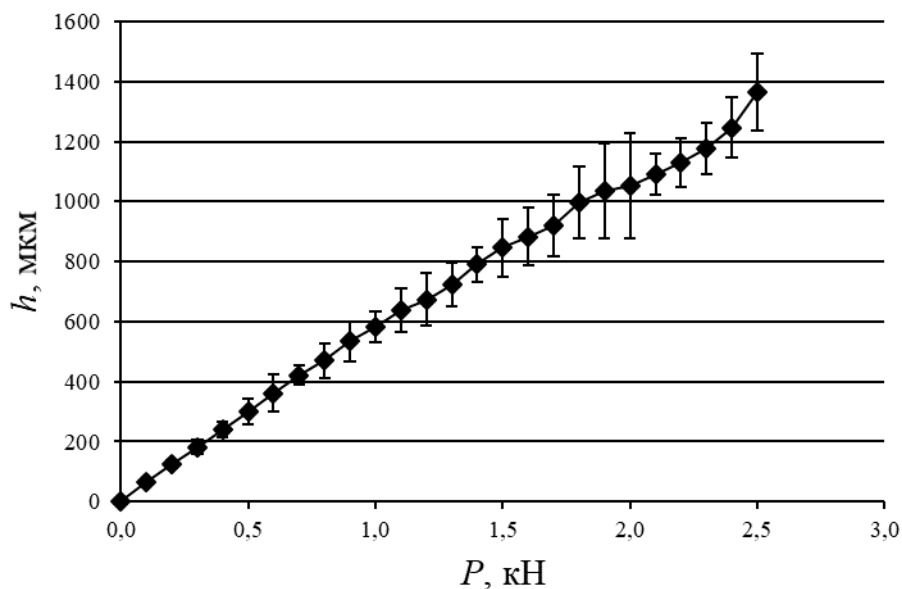


Рисунок 20. Деформация сжатия мёрзлого почвогрунта (опыт № 2, супесчаная основа, $T = -1,0$ °C)

Figure 20. Compression deformation of frozen soil (experiment No. 2, sandy loam base, $T = -1.0$ °C)

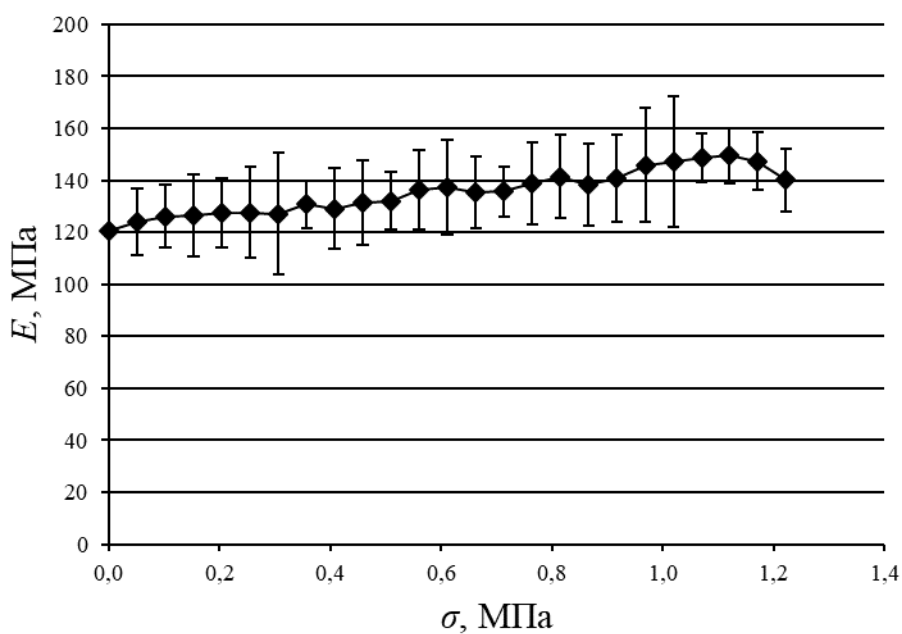


Рисунок 21. Модуль деформации мёрзлого почвогрунта (опыт № 2, супесчаная основа, $T = -1,0$ °C)

Figure 21. Modulus of deformation of frozen soil (experiment No. 2, sandy loam base, $T = -1.0$ °C)

Таблица 8. Результаты испытаний мёрзлого почвогрунта на сжатие (опыт № 3, супесчаная основа)

Table 8. Results of tests of frozen soil for compression (experiment No. 3, sandy loam base)

P , кН	σ , МПа	h , мкм		E , МПа	
		M	S	M	S
0,0	0,000	0,0	0,00	—	—
0,1	0,051	49,0	2,05	156,38	6,718
0,2	0,102	92,7	3,68	165,27	6,370
0,3	0,153	140,9	6,05	163,14	6,965
0,4	0,204	193,0	11,35	159,03	9,244
0,5	0,255	231,7	9,62	165,35	6,884
0,6	0,306	280,5	14,32	164,03	8,705
0,7	0,357	316,2	11,01	169,53	5,762
0,8	0,407	362,4	24,28	169,59	11,821
0,9	0,458	409,2	19,01	168,21	7,746
1,0	0,509	450,3	27,53	170,13	10,435
1,1	0,560	486,4	18,44	172,91	6,574
1,2	0,611	534,6	29,79	171,91	9,533
1,3	0,662	574,3	31,72	173,39	9,643
1,4	0,713	632,5	34,86	169,54	9,395
1,5	0,764	659,9	29,68	173,98	8,008
1,6	0,815	687,5	35,53	178,25	9,154
1,7	0,866	730,1	31,84	178,24	8,159
1,8	0,917	766,8	43,97	179,92	10,357
1,9	0,968	810,3	28,31	179,40	6,296
2,0	1,019	866,3	40,52	176,79	8,618
2,1	1,070	856,4	38,42	187,73	8,154
2,2	1,120	907,7	48,58	185,73	9,968
2,3	1,171	962,8	39,04	182,88	7,645
2,4	1,222	1010,4	41,08	181,84	7,345
2,5	1,273	1045,7	47,44	183,08	8,411
2,6	1,324	1071,0	21,90	185,65	3,754
2,7	1,375	1105,5	62,74	187,12	10,886
2,8	1,426	1148,1	41,78	186,53	6,696
2,9	1,477	1129,7	29,92	196,24	5,169
3,0	1,528	1213,9	78,21	189,55	12,722
3,1	1,579	1250,3	72,21	190,00	10,788
3,2	1,630	1225,2	28,65	199,66	4,698
3,3	1,681	1299,4	52,31	194,32	7,597
3,4	1,732	1442,4	90,72	180,80	12,111

Разрушение:

	M	S
$P_{разр}$, кН	3,71	0,2135
$\sigma_{сж,разр}$, МПа	1,889	0,1090
E , МПа	177,50	13,380

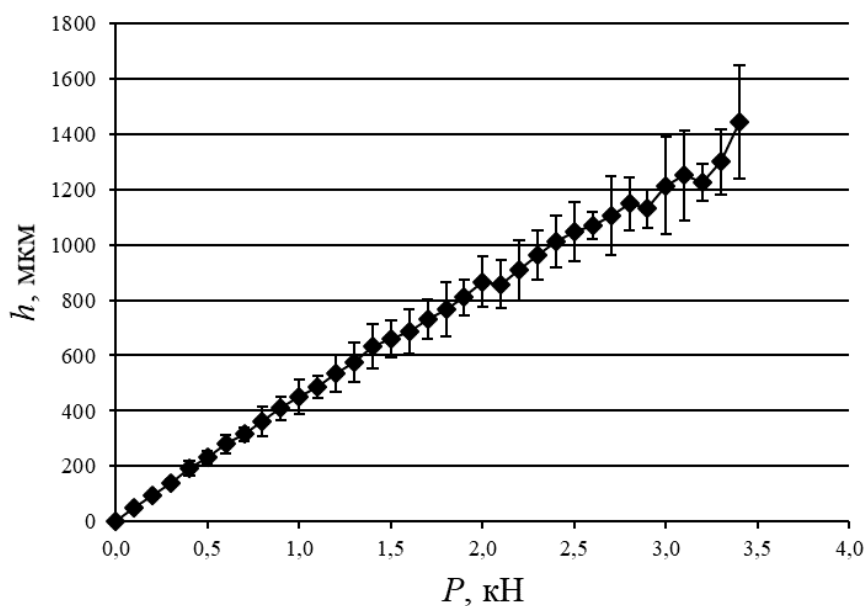


Рисунок 22. Деформация сжатия мёрзлого почвогрунта (опыт № 3, супесчаная основа, $T = -1,5\text{ }^\circ\text{C}$)

Figure 22. Compression deformation of frozen soil (experiment No. 3, sandy loam base, $T = -1.5\text{ }^\circ\text{C}$)

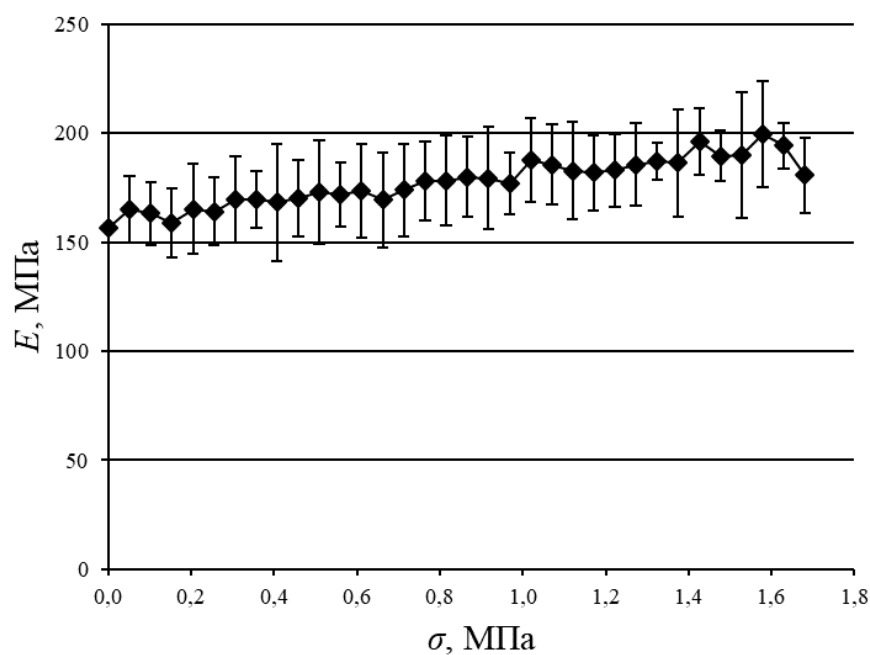


Рисунок 23. Модуль деформации мёрзлого почвогрунта (опыт № 3, супесчаная основа, $T = -1,5\text{ }^\circ\text{C}$)

Figure 23. Modulus of deformation of frozen soil (experiment No. 3, sandy loam base, $T = -1.5\text{ }^\circ\text{C}$)

Таблица 9. Результаты испытаний мёрзлого почвогрунта на сжатие (опыт № 4, суглинистая основа)

Table 9. Results of tests of frozen soil for compression (experiment No. 4, loam base)

P , кН	σ , МПа	h , мкм		E , МПа	
		M	S	M	S
0,0	0,000	0,0	0,00	—	—
0,1	0,051	150,9	8,41	50,84	2,816
0,2	0,102	290,2	18,56	52,90	3,296
0,3	0,153	438,0	25,56	52,57	3,151
0,4	0,204	568,1	24,64	53,94	2,336
0,5	0,255	707,2	32,98	54,19	2,442
0,6	0,306	815,1	32,11	56,39	2,274
0,7	0,357	966,2	32,51	55,49	1,824
0,8	0,407	1063,0	59,14	57,73	3,257
0,9	0,458	1144,6	51,20	60,12	2,681
1,0	0,509	1283,4	53,24	59,58	2,507
1,1	0,560	1384,2	75,52	60,84	3,181

Разрушение:

	M	S
$P_{разр}$, кН	1,08	0,0452
$\sigma_{сж,разр}$, МПа	0,552	0,0230
E , МПа	55,90	4,140

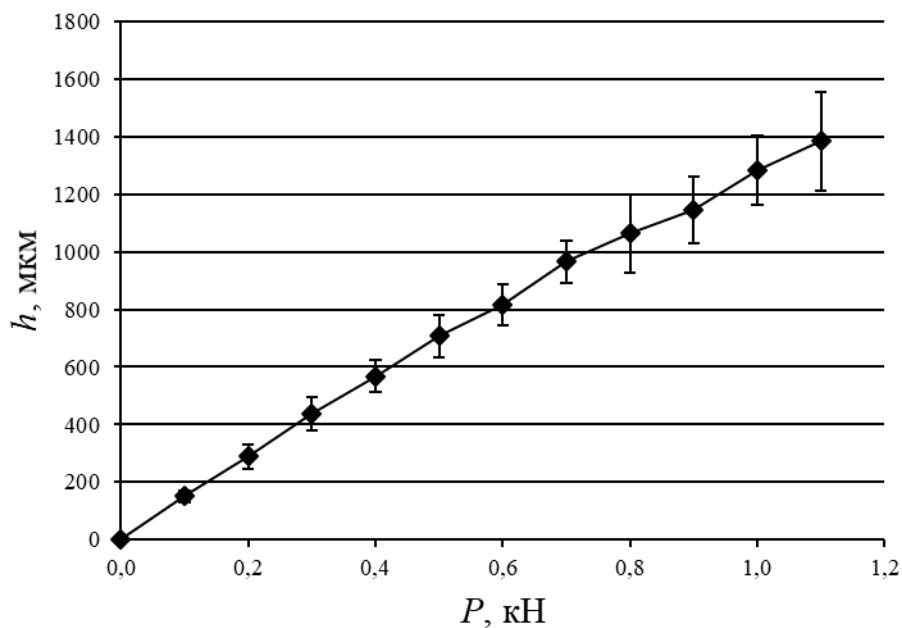


Рисунок 24. Деформация сжатия мерзлого почвогрунта (опыт № 4, суглинистая основа, $T = -1,0$ °C)

Figure 24. Compression deformation of frozen soil (experiment No. 4, loam base, $T = -1.0$ °C)

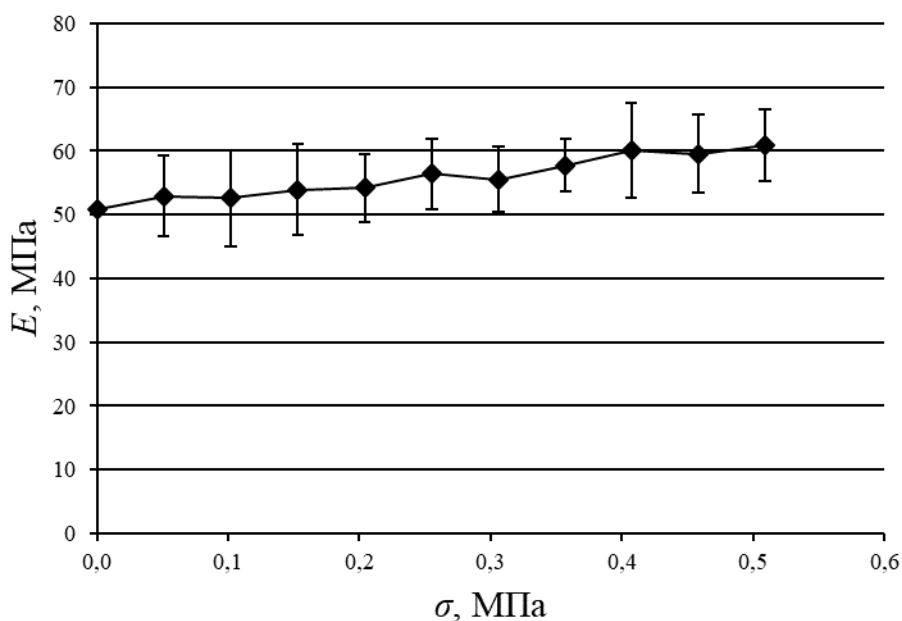


Рисунок 25. Модуль деформации мёрзлого почвогрунта (опыт № 4, суглинистая основа, $T = -1,0$ °C)

Figure 25. Modulus of deformation of frozen soil (experiment No. 4, loam base, $T = -1.0$ °C)

Таблица 10. Результаты испытаний мёрзлого почвогрунта на сжатие (опыт № 5, суглинистая основа)

Table 10. Results of tests of frozen soil for compression (experiment No. 5, loam base)

P , кН	σ , МПа	h , мкм		E , МПа	
		M	S	M	S
0,0	0,000	0,0	0,00	—	—
0,1	0,051	90,4	5,23	84,89	4,914
0,2	0,102	177,1	9,50	86,62	4,792
0,3	0,153	268,1	9,02	85,71	3,021
0,4	0,204	356,0	27,05	86,41	6,615
0,5	0,255	436,4	26,78	87,95	5,446
0,6	0,306	516,7	26,31	89,02	4,415
0,7	0,357	595,4	22,53	90,08	3,441
0,8	0,407	666,9	27,99	91,92	3,866
0,9	0,458	744,6	44,67	92,57	5,666
1,0	0,509	819,4	34,69	93,34	3,985
1,1	0,560	885,2	29,10	94,98	3,140
1,2	0,611	965,7	58,03	95,22	5,738
1,3	0,662	1013,7	39,96	98,09	3,760
1,4	0,713	1099,4	54,93	97,50	4,823
1,5	0,764	1179,9	83,96	97,56	7,002
1,6	0,815	1246,2	69,44	98,40	6,097
1,7	0,866	1274,7	68,76	102,17	5,384
1,8	0,917	1334,8	76,08	103,37	6,029
1,9	0,968	1431,3	89,94	101,80	6,140
2,0	1,019	1477,1	47,97	103,58	3,278
2,1	1,070	1517,7	76,73	106,01	5,348
2,2	1,120	1600,8	96,74	105,36	6,202
2,3	1,171	1632,8	62,81	107,79	4,128
2,4	1,222	1779,8	70,56	103,21	4,045

Разрушение:

	M	S
$P_{разр}$, кН	2,52	0,0561
$\sigma_{сж,разр}$, МПа	1,283	0,0290
E , МПа	96,00	8,470

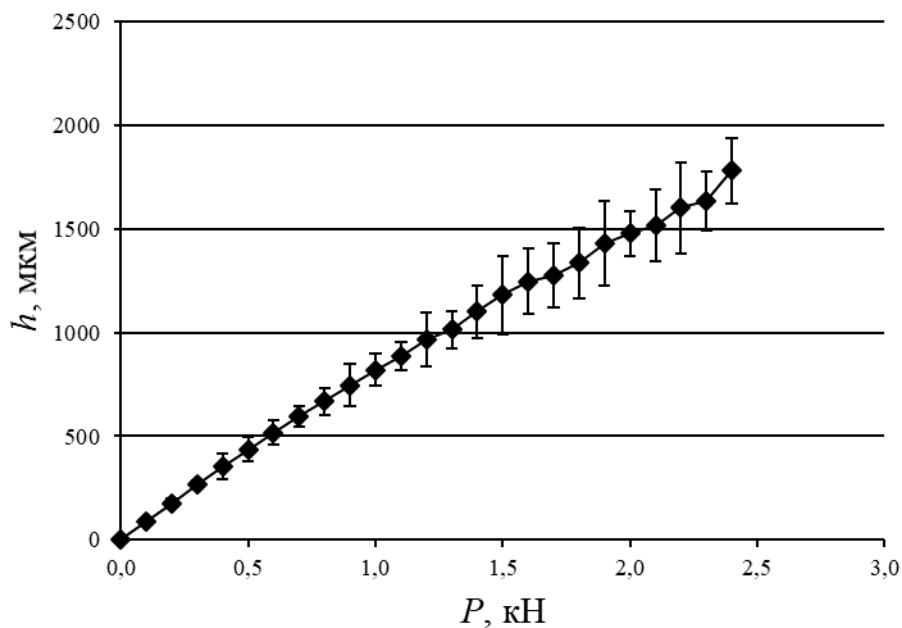


Рисунок 26. Деформация сжатия мёрзлого почвогрунта (опыт № 5, суглинистая основа, $T = -1,5$ °C)

Figure 26. Compression deformation of frozen soil (experiment No. 5, loam base, $T = -1.5$ °C)

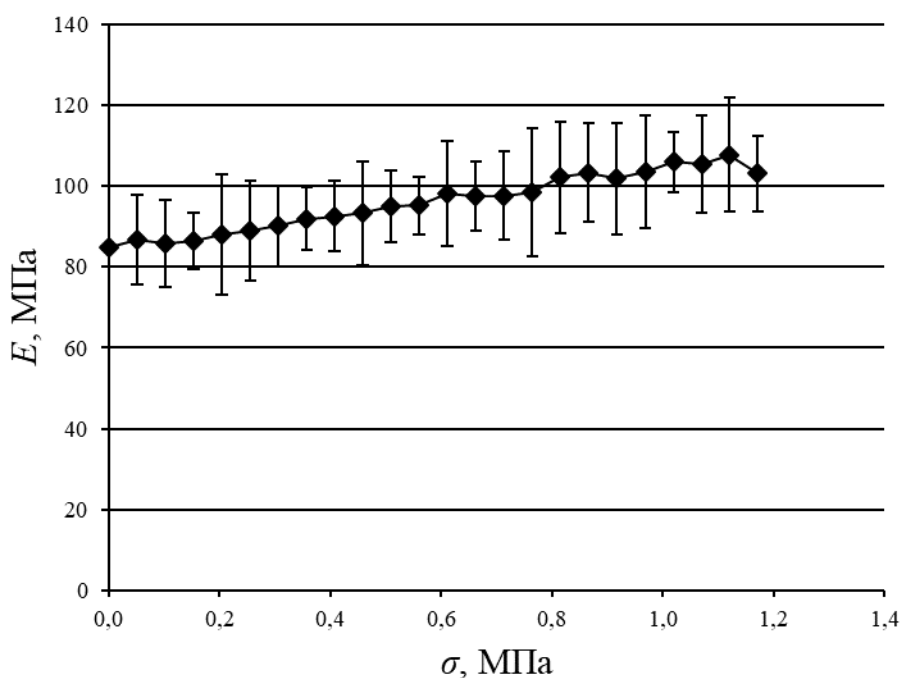


Рисунок 27. Модуль деформации мёрзлого почвогрунта (опыт № 5, суглинистая основа, $T = -1,5$ °C)

Figure 27. Modulus of deformation of frozen soil (experiment No. 5, loam base, $T = -1.5$ °C)

Таблица 11. Результаты испытаний мёрзлого почвогрунта на сжатие (опыт № 6, суглинистая основа)

Table 11. Results of tests of frozen soil for compression (experiment No. 6, loam base)

P , кН	σ , МПа	h , мкм		E , МПа	
		M	S	M	S
0,0	0,000	0,0	0,00	—	—
0,1	0,051	71,6	4,38	107,19	6,313
0,2	0,102	141,1	9,36	108,87	7,416
0,3	0,153	197,5	13,24	116,67	7,890
0,4	0,204	270,0	14,79	113,64	6,195
0,5	0,255	338,2	17,59	113,39	6,296
0,6	0,306	410,3	12,36	111,97	3,359
0,7	0,357	462,3	17,07	115,98	4,396
0,8	0,407	535,6	23,32	114,46	5,030
0,9	0,458	603,7	35,97	114,15	6,714
1,0	0,509	659,3	20,49	115,90	3,676
1,1	0,560	695,4	34,86	121,08	6,179
1,2	0,611	768,6	36,15	119,47	5,567
1,3	0,662	814,7	32,63	122,07	4,972
1,4	0,713	890,6	60,51	120,57	7,894
1,5	0,764	919,0	38,65	124,90	5,290
1,6	0,815	985,2	40,57	124,30	5,217
1,7	0,866	1062,5	35,97	122,38	4,106
1,8	0,917	1093,8	50,10	126,00	5,713
1,9	0,968	1142,2	46,12	127,31	5,217
2,0	1,019	1213,9	67,71	126,26	7,021
2,1	1,070	1282,9	78,35	125,53	7,900
2,2	1,120	1283,8	64,01	131,28	6,561
2,3	1,171	1357,5	58,54	129,71	5,548
2,4	1,222	1387,0	43,16	132,37	3,947
2,5	1,273	1414,0	88,66	135,66	8,973
2,6	1,324	1498,5	89,94	133,06	8,120
2,7	1,375	1546,5	93,86	133,83	8,619
2,8	1,426	1573,2	55,39	136,12	4,864
2,9	1,477	1609,2	71,61	137,92	6,177
3,0	1,528	1654,8	95,15	138,91	7,757
3,1	1,579	1676,4	58,24	141,44	4,784
3,2	1,630	1726,5	71,29	141,84	5,870
3,3	1,681	1791,7	109,65	141,21	8,770
3,4	1,732	1867,5	123,43	139,65	8,768
3,5	1,783	1845,2	85,98	145,23	6,830
3,6	1,833	1899,5	90,50	145,12	6,619
3,7	1,884	2090,4	99,64	135,52	6,620

Разрушение:

	M	S
$P_{разр}$, кН	4,00	0,2031
$\sigma_{сж,разр}$, МПа	2,037	0,1030
E , МПа	126,80	12,350

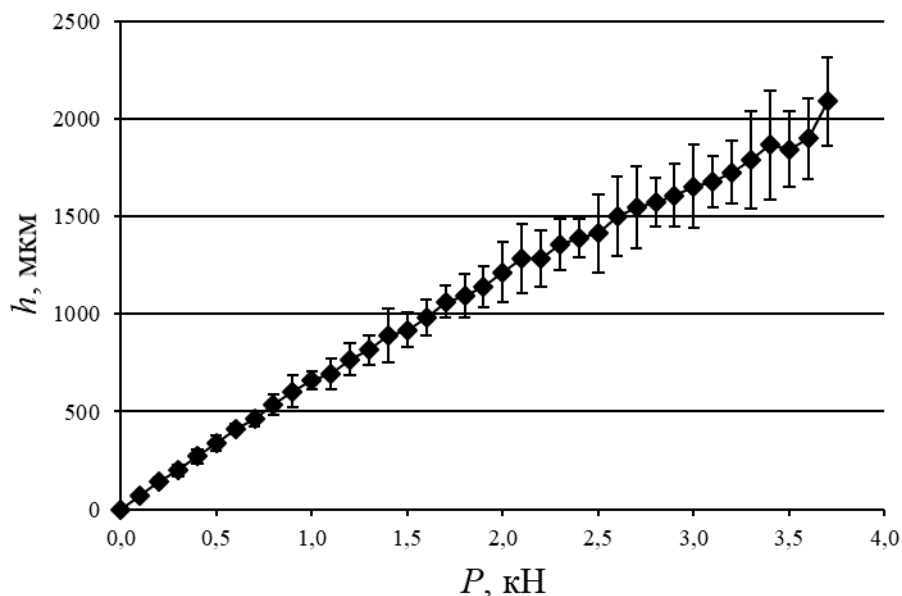


Рисунок 28. Деформация сжатия мёрзлого почвогрунта (опыт № 6, суглинистая основа, $T = -2,0$ °С)

Figure 28. Compression deformation of frozen soil (experiment No. 6, loam base, $T = -2.0$ °С)

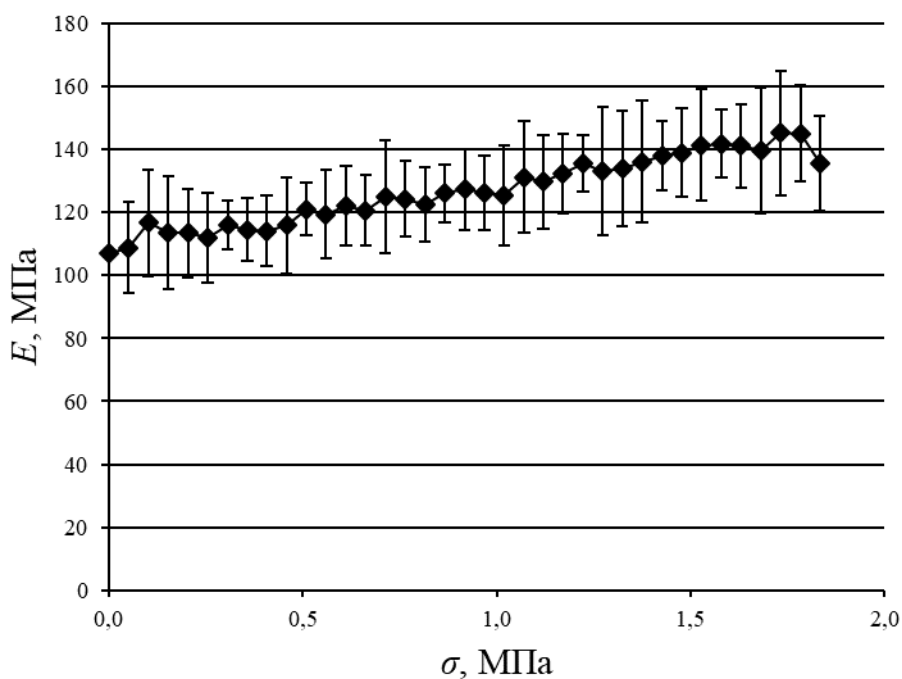


Рисунок 29. Модуль деформации мёрзлого почвогрунта (опыт № 6, суглинистая основа, $T = -2,0$ °С)

Figure 29. Modulus of deformation of frozen soil (experiment No. 6, loam base, $T = -2.0$ °С)

Таблица 12. Результаты испытаний мёрзлого почвогрунта на сжатие (опыт № 7, глинистая основа)

Table 12. Results of tests of frozen soil for compression (experiment No. 7, clay base)

P , кН	σ , МПа	h , мкм		E , МПа	
		M	S	M	S
0,0	0,000	0,0	0,00	—	—
0,1	0,051	247,3	11,48	31,00	1,439
0,2	0,102	476,0	22,77	32,20	1,571
0,3	0,153	696,1	21,41	32,99	1,016
0,4	0,204	786,9	66,24	39,12	3,135

Разрушение:

	M	S
$P_{разр}$, кН	0,34	0,0242
$\sigma_{сж,разр}$, МПа	0,173	0,0120
E , МПа	33,80	3,690

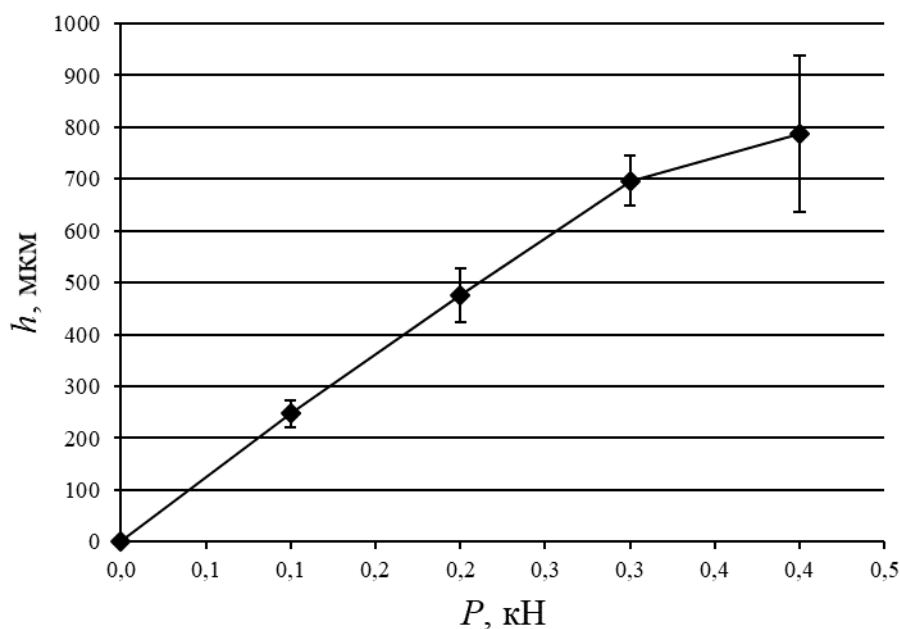


Рисунок 30. Деформация сжатия мёрзлого почвогрунта (опыт № 7, глинистая основа, $T = -1,5$ °C)

Figure 30. Compression deformation of frozen soil (experiment No.7, clay base, $T = -1.5$ °C)

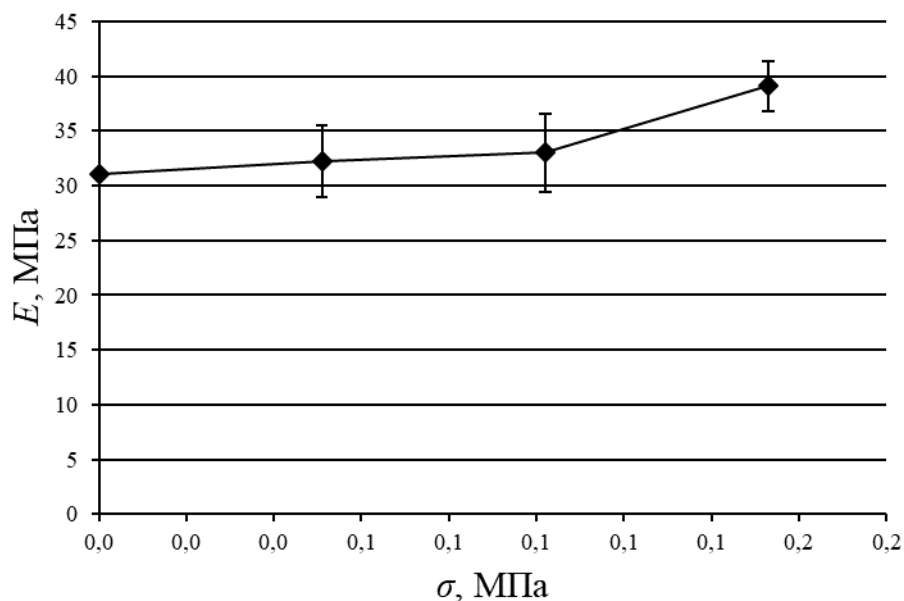


Рисунок 31. Модуль деформации мёрзлого почвогрунта (опыт № 7, глинистая основа, $T = -1,5$ °C)

Figure 31. Modulus of deformation of frozen soil (experiment No. 7, clay base, $T = -1.5$ °C)

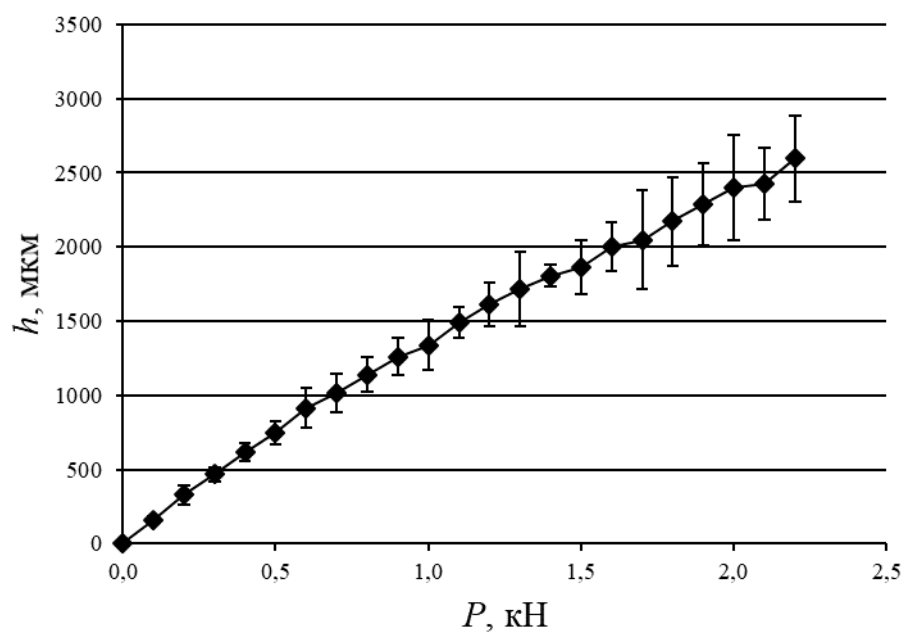


Рисунок 32. Деформация сжатия мёрзлого почвогрунта (опыт № 8, глинистая основа, $T = -2,0$ °C)

Figure 32. Compression deformation of frozen soil (experiment No. 8, clay base, $T = -2.0$ °C)

Таблица 13. Результаты испытаний мёрзлого почвогрунта на сжатие (опыт № 8, глинистая основа)

Table 13. Results of tests of frozen soil for compression (experiment No. 8, clay base)

P , кН	σ , МПа	h , мкм		E , МПа	
		M	S	M	S
0,0	0,000	0,0	0,00	—	—
0,1	0,051	159,4	12,56	48,26	3,887
0,2	0,102	328,0	27,93	46,94	3,901
0,3	0,153	466,9	21,36	49,24	2,220
0,4	0,204	615,8	26,02	49,76	2,105
0,5	0,255	744,6	35,03	51,47	2,382
0,6	0,306	914,1	60,38	50,39	3,193
0,7	0,357	1016,5	57,45	52,82	3,052
0,8	0,407	1140,1	51,07	53,78	2,439
0,9	0,458	1260,0	55,32	54,61	2,323
1,0	0,509	1337,9	74,88	57,23	3,209
1,1	0,560	1486,9	45,87	56,54	1,763
1,2	0,611	1613,5	64,56	56,88	2,276
1,3	0,662	1716,3	112,31	58,10	3,994
1,4	0,713	1803,1	32,57	59,32	1,079
1,5	0,764	1866,7	80,20	61,49	2,627
1,6	0,815	2004,4	71,95	61,07	2,190
1,7	0,866	2047,0	148,04	63,76	4,508
1,8	0,917	2171,5	132,30	63,57	3,960
1,9	0,968	2283,7	122,24	63,74	3,285
2,0	1,019	2399,2	157,76	63,95	4,096
2,1	1,070	2425,9	108,23	66,29	2,921
2,2	1,120	2596,7	129,03	64,89	3,191

Разрушение:

	M	S
$P_{разр}$, кН	2,30	0,1519
$\sigma_{сж,разр}$, МПа	1,173	0,0780
E , МПа	57,00	6,610

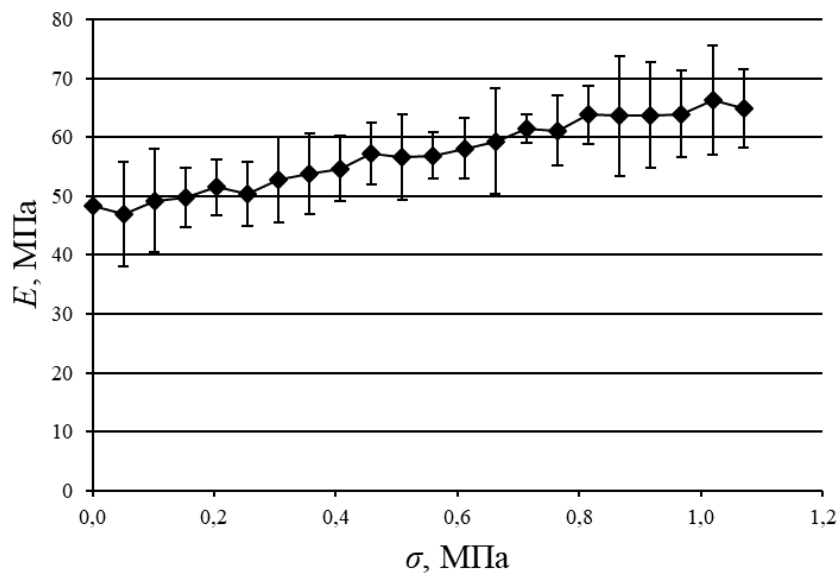


Рисунок 33. Модуль деформации мёрзлого почвогрунта (опыт № 8, глинистая основа, $T = -2,0$ °C)

Figure 33. Modulus of deformation of frozen soil (experiment No. 8, clay base, $T = -2.0$ °C)

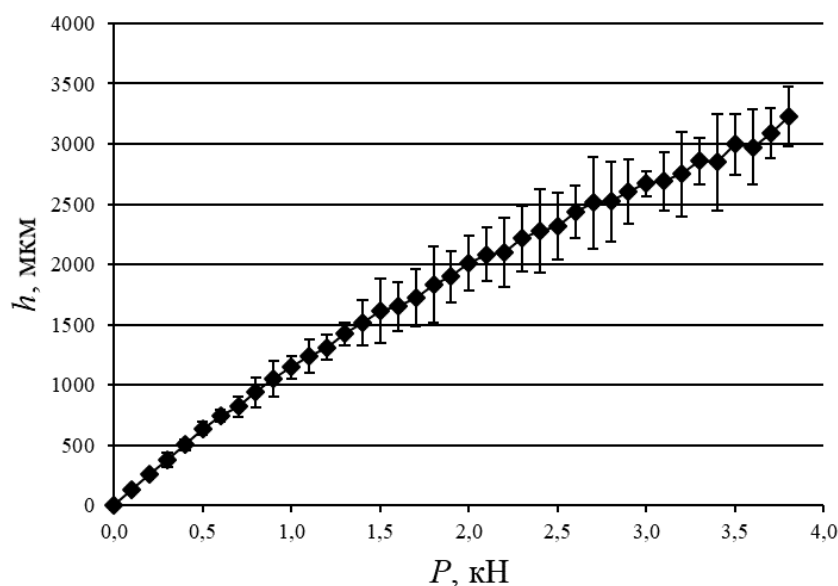


Рисунок 34. Деформация сжатия мёрзлого почвогрунта (опыт № 9, глинистая основа, $T = -2,5$ °C)

Figure 34. Compression deformation of frozen soil (experiment No. 9, clay base, $T = -2.5$ °C)

Таблица 14. Результаты испытаний мёрзлого почвогрунта на сжатие (опыт № 9, глинистая основа)

Table 14. Results of tests of frozen soil for compression (experiment No. 9, clay base)

P , кН	σ , МПа	h , мкм		E , МПа	
		M	S	M	S
0,0	0,000	0,0	0,00	—	—
0,1	0,051	133,6	6,43	57,37	2,732
0,2	0,102	264,2	6,84	57,97	1,530
0,3	0,153	378,8	24,37	60,82	4,038
0,4	0,204	504,8	18,91	60,71	2,334
0,5	0,255	638,8	23,25	59,95	2,119
0,6	0,306	743,3	23,44	61,79	1,946
0,7	0,357	820,8	37,50	65,37	2,949
0,8	0,407	937,7	52,96	65,44	3,684
0,9	0,458	1050,4	66,53	65,67	4,283
1,0	0,509	1147,1	40,62	66,65	2,382
1,1	0,560	1238,2	60,94	68,00	3,424
1,2	0,611	1311,8	45,31	69,94	2,407
1,3	0,662	1423,0	40,96	69,83	2,004
1,4	0,713	1518,0	82,44	70,64	3,817
1,5	0,764	1614,4	117,99	71,33	5,257
1,6	0,815	1650,1	88,91	74,28	4,171
1,7	0,866	1726,2	104,62	75,49	4,522
1,8	0,917	1833,1	140,19	75,46	6,093
1,9	0,968	1897,4	95,86	76,71	3,903
2,0	1,019	2012,0	99,88	76,14	3,740
2,1	1,070	2083,6	99,61	77,19	3,726
2,2	1,120	2097,6	127,12	80,44	4,944
2,3	1,171	2213,8	118,91	79,63	4,377
2,4	1,222	2280,5	152,70	80,77	5,533
2,5	1,273	2315,9	122,82	82,73	4,578
2,6	1,324	2437,2	96,00	81,66	3,312
2,7	1,375	2511,2	167,89	82,44	5,271
2,8	1,426	2523,4	147,07	85,03	5,147
2,9	1,477	2605,0	118,32	85,21	3,967
3,0	1,528	2669,7	45,02	85,89	1,445
3,1	1,579	2689,3	106,51	88,18	3,516
3,2	1,630	2748,0	157,05	89,25	5,184
3,3	1,681	2858,2	85,90	88,30	2,676
3,4	1,732	2849,4	177,63	91,50	5,800
3,5	1,783	2995,8	111,24	89,39	3,321
3,6	1,833	2971,3	138,07	92,76	4,307
3,7	1,884	3086,3	91,70	91,68	2,739
3,8	1,935	3229,5	108,61	90,02	2,996

Разрушение:

	M	S
$P_{разр}$, кН	3,96	0,1179
$\sigma_{сж,разр}$, МПа	2,018	0,0600
E , МПа	76,10	11,230

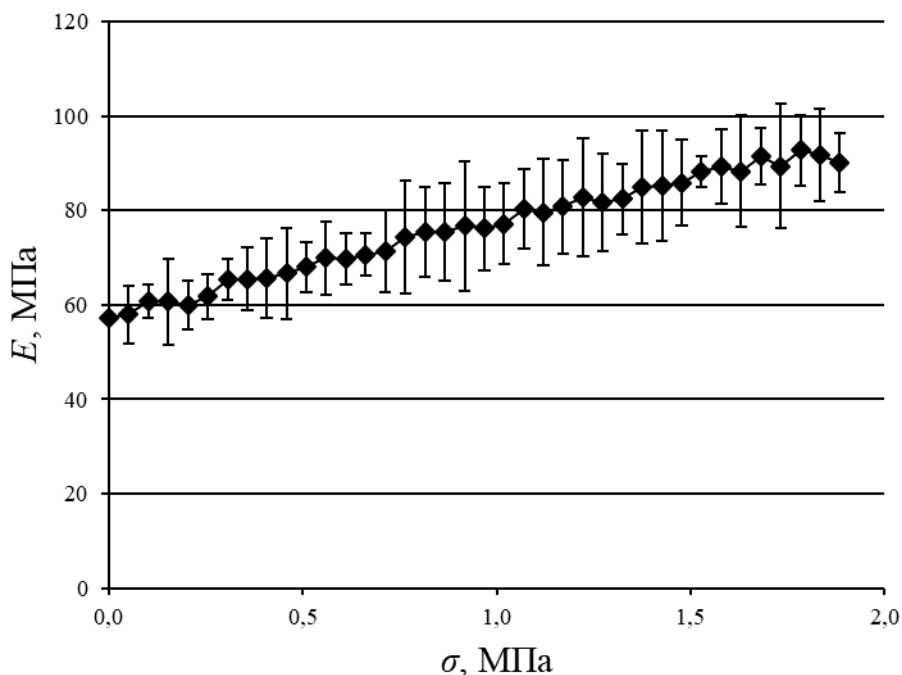


Рисунок 35. Модуль деформации мёрзлого почвогрунта (опыт № 9, глинистая основа, $T = -2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Figure 35. Modulus of deformation of frozen soil (experiment No.9, clay base, $T = -2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$)

В таблице 15 представлены сводные данные по прочности мёрзлых почвогрунтов на сжатие, в таблице 16 — оценки модуля деформации мёрзлых почвогрунтов при сжимающей нагрузке вблизи предела прочности.

Таблица 15. Предел прочности на сжатие [МПа] образцов мёрзлого почвогрунта (сводные данные)

Table 15. The limit of compressive strength [MPa] of frozen soil samples (summary data)

$T, \text{ }^{\circ}\text{C}$	Мерзлотно-палево-бурые почвы с супесчаной грунтовой основой (экспериментальные срезы № 1—3)		$T, \text{ }^{\circ}\text{C}$	Перегноино-карбонатные почвы с суглинистой основой (экспериментальные срезы № 4—6)		$T, \text{ }^{\circ}\text{C}$	Криозёмные глеевые почвы с глинистой основой (экспериментальные срезы № 7—9)	
	Средн.	Δ		Средн.	Δ		Средн.	Δ
-0,6	0,9527	0,095	-1	0,5518	0,0575	-1,5	0,1727	0,03
-1	1,34	0,1	-1,5	1,2829	0,0725	-2	1,1732	0,195
-1,5	1,8893	0,2725	-2	2,0372	0,2575	-2,5	2,0181	0,15

Таблица 16. Модуль деформации [МПа] образцов мёрзлого почвогрунта (сводные данные)

Table 16. Modulus of deformation [MPa] of frozen soil samples (summary data)

$T, ^\circ\text{C}$	Мерзотно-палево-бурые почвы с супесчаной грунтовой основой (экспериментальные срезы № 1—3)		$T, ^\circ\text{C}$	Перегноино-карбонатные почвы с суглинистой основой (экспериментальные срезы № 4—6)		$T, ^\circ\text{C}$	Криозёмные глеевые почвы с глинистой основой (экспериментальные срезы № 7—9)	
	Средн.	Δ		Средн.	Δ		Средн.	Δ
-0,6	89,4	16,95	-1	55,9	10,35	-1,5	33,8	9,225
-1	135,4	26,2	-1,5	96	21,175	-2	57	16,525
-1,5	177,5	33,45	-2	126,8	30,875	-2,5	76,1	28,075

Данные таблиц 15, 16 проиллюстрированы графиками на рисунках 36, 37.

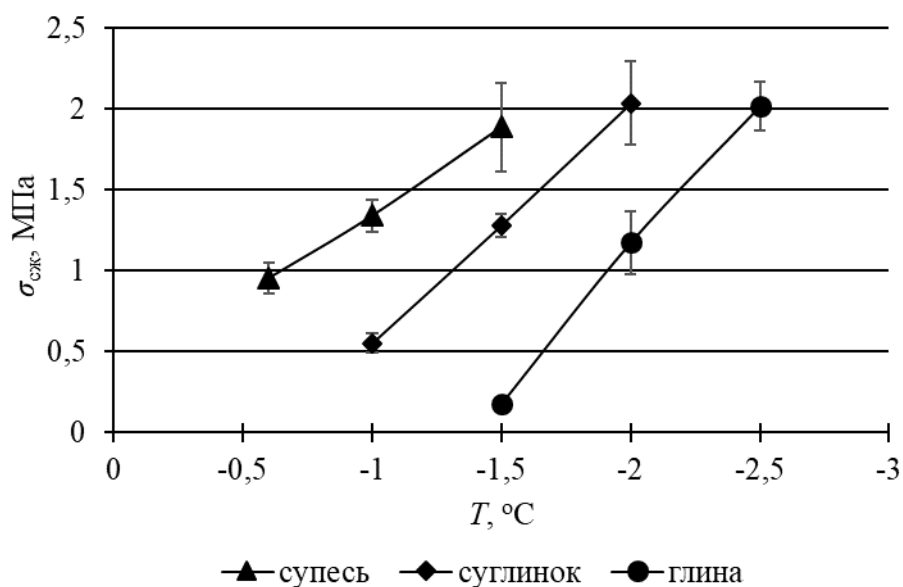


Рисунок 36. Предел прочности на сжатие [МПа] образцов мёрзлого почвогрунта (сводные данные)

Figure 36. The limit of compressive strength [MPa] of frozen soil samples (summary data)

Полученные экспериментальные данные свидетельствуют, что по мере понижения температуры, начиная с точки заморзания, модуль деформации и предел прочности почвогрунта на сжатие стремительно увеличиваются. Для почвогрунта с супесчаной и суглинистой основой снижение температуры на 1°C от точки заморзания приводит к 2—4-кратному повышению механических характеристик, для почвогрунта с глинистой основой на

порядок отмечается повышение механических характеристик. Таким образом, теоретические положения по оценке изменения модуля деформации и прочности почвогрунта на сжатие, сформулированные в работах [17—26], нашли экспериментальное подтверждение.

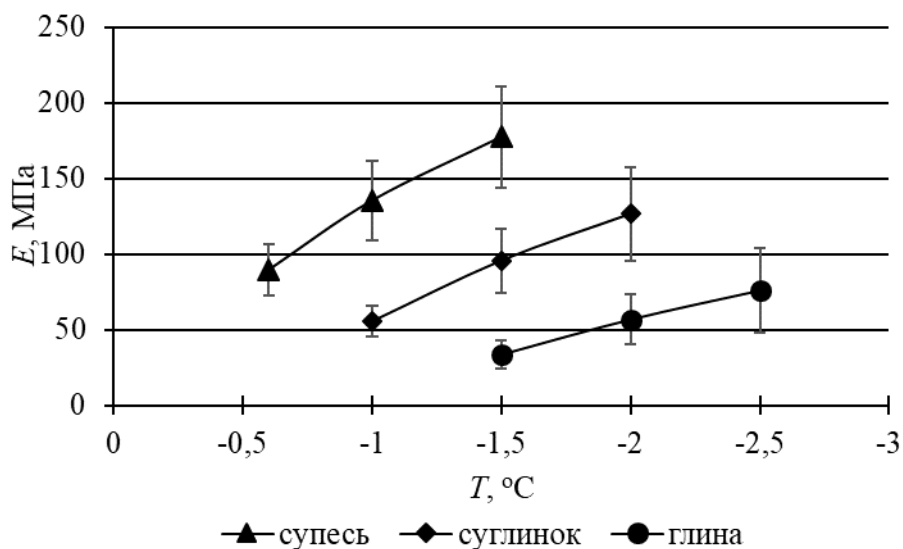


Рисунок 37. Модуль деформации [МПа] образцов мёрзлого почвогрунта (сводные данные)

Figure 37. Modulus of deformation [MPa] of frozen soil samples (summary data)

С целью проверки адекватности теоретической оценки глубины колеи были выполнены опыты по изучению колееобразования на мёрзлых почвогрунтах при различном давлении движителя на почвогрунт. Результаты экспериментальных замеров глубины колеи и модуля деформации почвогрунта в контрольных точках представлены в таблице 17.

Таблица 17. Результаты экспериментальных замеров глубины колеи и модуля деформации почвогрунта

Table 17. Results of experimental measurements of track depth and soil deformation modulus

$q = 27$ кПа			$q = 35$ кПа			$q = 58$ кПа		
E , МПа	h , см	S , см	E , МПа	h , см	S , см	E , МПа	h , см	S , см
1,39	15,6	1,4	2,96	10,7	1,07	4,07	15,2	0,76
3,55	10	0,5	1,36	19,6	1,76	2,17	17,1	1,2
1,25	16,7	0,84	2,73	13,5	1,62	1,21	18,7	1,87
4,61	10,6	0,95	4,96	10,9	0,76	4,00	14,6	1,17
4,36	11	1,21	3,38	12	1,44	4,71	13,9	0,7
1,22	17,1	0,86	4,39	12,2	1,34	4,24	13,6	0,82
2,15	14,2	1,7	3,87	12,7	1,52	3,37	15,7	1,57
3,57	9,3	1,12	2,57	15,2	0,91	3,51	12,3	0,86
1,02	18,5	1,11	1,68	13,7	1,51	2,75	15,8	1,58
4,21	10,9	0,55	1,38	19,7	1,97	3,26	13,6	0,95

Табличные данные представлены на рисунках 38—40, там же приведены результаты теоретической оценки глубины колеи по результатам упомянутых выше теоретических исследований.

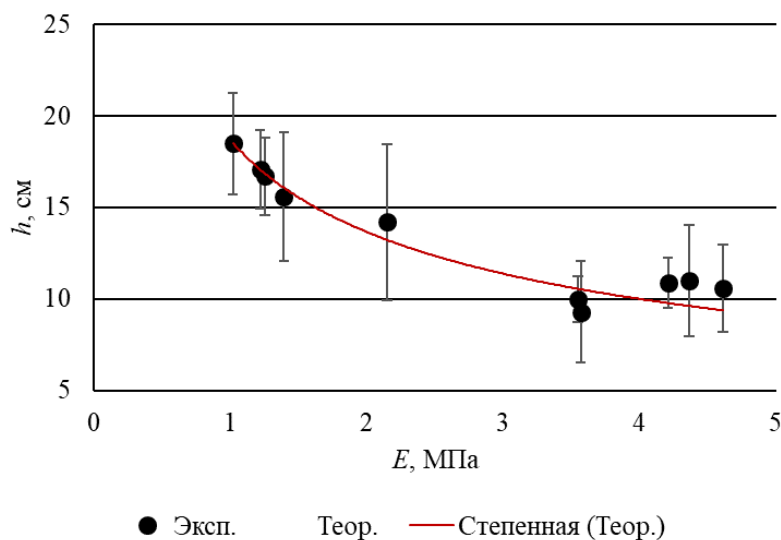


Рисунок 38. Сопоставление теоретической оценки глубины колеи, образующейся при работе техники на мёрзлом почвогрунте, с опытными данными (давление на грунт 27 кПа)

Figure 38. Comparison of the theoretical estimate of the depth of the track formed during the operation of equipment on frozen soil with experimental data (ground pressure 27 kPa)

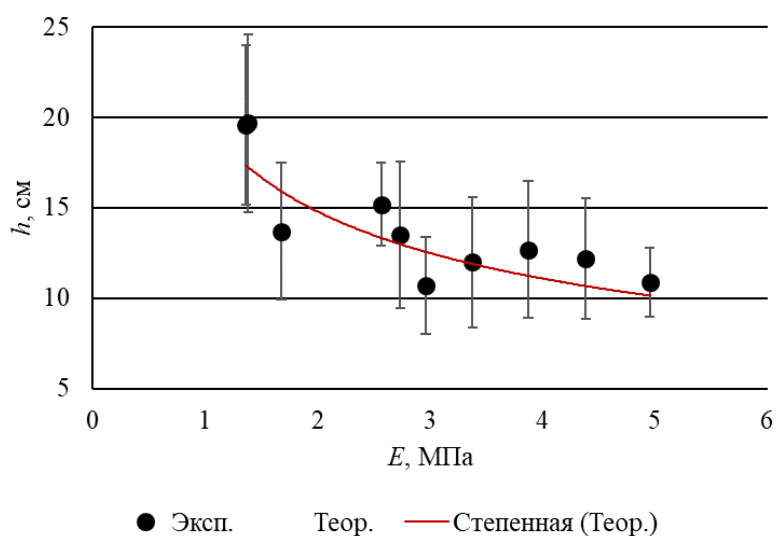


Рисунок 39. Сопоставление теоретической оценки глубины колеи, образующейся при работе техники на мёрзлом почвогрунте, с опытными данными (давление на грунт 35 кПа)

Figure 39. Comparison of the theoretical estimate of the track depth formed during the operation of equipment on frozen soil with experimental data (ground pressure 35 kPa)

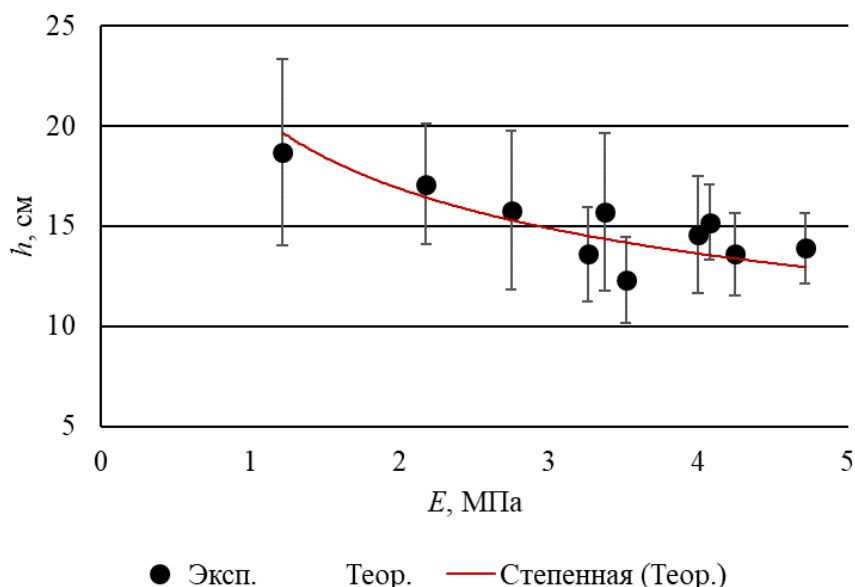


Рисунок 40. Сопоставление теоретической оценки глубины колеи, образующейся при работе техники на мёрзлом почвогрунте, с опытными данными (давление на грунт 58 кПа)

Figure 40. Comparison of the theoretical estimate of the track depth formed during the operation of equipment on frozen soil with experimental data (ground pressure 58 kPa)

В результате сопоставления теоретических и экспериментальных данных установлено, что теоретическая оценка глубины колеи на мёрзлых почвогрунтах с модулем деформации в пределах 1—5 МПа при давлении движителя в пределах 27—58 кПа отличается от эксперимента не более чем на 17 %; отличия находятся в пределах доверительных границ варьирования экспериментальной величины.

4. Выводы

В результате вышеприведённого анализа установлено:

1. Анализ полученных данных показывает, что температура мёрзлой и оттаивающей мерзлотно-палево-бурой почвы с супесчаной грунтовой основой, перегнойно-карбонатной почвы с суглинистой основой, криозёмной глеевой почвы с глинистой основой изменяется по глубине в соответствии с квадратичным законом, причём согласование экспериментальных данных с результатами аппроксимации весьма высокое ($R^2 > 0,9$). Установлено качественное и количественное согласование теоретической оценки функции относительного изменения температуры почвогрунта по глубине, полученное в теоретической части работы, с опытными данными, расхождение находится в пределах доверительных границ варьирования экспериментальной величины и не превышает 30 %.

2. Полученные экспериментальные данные свидетельствуют, что по мере понижения температуры, начиная с точки замерзания, модуль деформации и предел прочности почвогрунта на сжатие стремительно увеличиваются. Для почвогрунта с супесчаной и суглинистой основой снижение температуры на 1 °С от точки замерзания приводит к 2—4-кратному повышению механических характеристик, для почвогрунта с глинистой основой на порядок отмечается повышение механических характеристик. Таким образом, теоретические положения по оценке изменения модуля деформации и прочности почвогрунта на сжатие, сформулированные в работах [17—26], нашли экспериментальное подтверждение.
3. В результате сопоставления теоретических и экспериментальных данных установлено, что теоретическая оценка глубины колеи на мёрзлых почвогрунтах с модулем деформации в пределах 1—5 МПа при давлении движителя в пределах 27—58 кПа отличается от эксперимента не более чем на 17 %; отличия находятся в пределах доверительных границ варьирования экспериментальной величины.

Список литературы

1. Бурмистрова О. Н., Чемшикова Ю. М., Григорьев И. В., Куницкая О. А., Тамби А. А. Теоретическое обоснование параметров средооадающего движителя гусеничного вездехода // Системы. Методы. Технологии. 2019. № 2 (42). С. 81—88. DOI: 10.18324/2077-5415-2019-3-81-88.
2. Добрецов Р. Ю., Григорьев И. В., Рудов С. Е., Тетеревлева Е. В., Чемшикова Ю. М. Увеличение подвижности гусеничных и колёсных машин // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2019. № 11. С. 4—10. DOI: 10.31044/1684-2561-2019-0-11-4-10.
3. Григорьев И. В., Рудов С. Е. Особенности эксплуатации колёсных лесных машин в сложных почвенно-грунтовых и рельефных условиях // Forest Engineering: Материалы научно-практич. конф. с междунар. участием. Якутск, 2018. С. 67—71.
4. Агейкин Я. С. Проходимость автомобилей. М.: Машиностроение, 1981. 232 с.
5. Saarilahti M. Development of a protocol for ecoefficient wood harvesting on sensitive sites (Ecowood). Soil interaction model. Helsinki: University of Helsinki, Department of Forest Resource Management, 2002. 39 p.
6. Григорьев И. В. Снижение отрицательного воздействия на почву колёсных трелёвочных тракторов обоснованием режимов их движения и технологического оборудования. СПб.: Санкт-Петербургская лесотехническая академия, 2006. 235 с.
7. Бартенев И. М., Драпалюк М. В. Снижение вредного воздействия лесных тракторов и лесосечных машин на почву и насаждения // Лесотехнический журнал. 2012. № 1 (5). С. 61—66.
8. Герасимов Ю. Ю., Сюнёв В. С. Экологическая оптимизация технологических машин для лесозаготовок. Йоэнсуу: Университет Йоэнсуу, 1998. 178 с.
9. Хахина А. М. Методы прогнозирования и повышения проходимости колёсных лесных машин: Дис. ... д-ра техн. наук. Архангельск: С(А)ФУ, 2018. 318 с.
10. Ларин В. В. Методы прогнозирования опорной проходимости многоосных колёсных машин на местности: Дис. ... д-ра техн. наук. М., 2007. 530 с.

11. *Песков В. Б.* Совершенствование моделей для оценки колееобразования и уплотнения почвогрунтов под воздействием движителей колёсных лесных машин: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Архангельск: С(А)ФУ, 2018. 20 с.
12. *Золотаревская Д. И.* Закономерности динамического деформирования почв при циклических нагрузках // Почвоведение. 2005. № 5. С. 565—574.
13. *Золотаревская Д. И.* Изменение реологических свойств и плотности дерново-подзолистой почвы при динамических нагрузках // Почвоведение. 2010. № 3. С. 313—323.
14. *Золотаревская Д. И.* Изменение реологических свойств и плотности дерново-подзолистой супесчаной почвы при воздействии колёсного трактора // Почвоведение. 2013. № 7. С. 829.
15. *Золотаревская Д. И.* Исследование и расчёт уплотнения почвы при работе и после остановки колёсного трактора // Тракторы и сельхозмашины. 2016. № 8. С. 33—38.
16. *Иванов В. А., Хахина А. М., Устинов В. В., Коротков Р. К.* Уточнённые зависимости для расчёта сдвиговой деформации лесного почвогрунта по величине буксования и параметрам пятна контакта // Системы. Методы. Технологии. 2015. № 4 (28). С. 116—120.
17. *Рудов С. Е., Шапиро В. Я., Григорьев И. В., Куницкая О. А., Григорьева О. И.* Особенности контактного взаимодействия трелёвочной системы с мёрзлым почвогрунтом // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2019. № 1 (367). С. 106—119. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.1.106.
18. *Рудов С. Е., Шапиро В. Я., Григорьев И. В., Куницкая О. А., Григорьева О. И.* Исследование процесса разрушения мёрзлых и оттаивающих почвогрунтов при воздействии трелёвочной системы // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2020. № 2 (374). С. 101—117. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-2-101-117.
19. *Рудов С. Е., Шапиро В. Я., Григорьев И. В., Куницкая О. А., Григорьева О. И.* Обоснование исходных требований математической модели взаимодействия колёсных лесных машин с мёрзлым и оттаивающим грунтом // Системы. Методы. Технологии. 2020. № 1 (45). С. 72—79. DOI: 10.18324/2077-5415-2020-1-72-79.
20. *Рудов С. Е., Шапиро В. Я., Григорьев И. В., Куницкая О. А., Григорьева О. И.* Вариационный метод расчёта параметров взаимодействия трелёвочной системы с массивом мёрзлых и оттаивающих почвогрунтов // Системы. Методы. Технологии. 2019. № 1 (41). С. 68—77. DOI: 10.18324/2077-5415-2019-1-68-77.
21. *Рудов С. Е., Шапиро В. Я., Григорьев И. В., Куницкая О. А., Григорьева О. И.* Оценка несущей способности мёрзлого и оттаявшего грунта при неполной информации о состоянии его взаимодействия с трелёвочной системой // Системы. Методы. Технологии. 2019. № 2 (42). С. 80—86. DOI: 10.18324/2077-5415-2019-2-80-86.
22. *Rudov S. E., Grigorev I. V., Kunitskaya O. A., Druzyanova V. P., Pekhutov A. S., Ivanov A. P., Ivanov A. K., Okhlopkova M. K., Pankov V. Yu., Borovikov R. G.* Specific features of accounting of state of the massive of the frozen soil grounds under cyclic loads // Bulgarian Journal of Agricultural Science. 2019. Т. 25, No. S2. P. 191—205.
23. *Рудов С. Е., Шапиро В. Я., Григорьев И. В., Куницкая О. А., Григорьев М. Ф., Пучнин А. Н.* Особенности учёта состояния массива мёрзлых грунтов при циклическом взаимодействии с трелёвочной системой // Лесотехнический журнал. 2019. Т. 9, № 1 (33). С. 116—128. DOI: 10.12737/article_5c92016f49c838.40242030.
24. *Rudov S., Shapiro V., Grigorev I., Kunitskaya O., Druzyanova V., Kokieva G., Filatov A., Sleptsova M., Bondarenko A., Radnaed D.* Specific features of influence of propulsion plants of the wheel-tyre tractors upon the cryomorphic soils, soils, and soil grounds // International Journal of Civil Engineering and Technology. 2019. Т. 10, No. 1. P. 2052—2071.
25. *Rudov S. E., Grigorev I. V., Kunitskaya O. A., Ivanov N. A., Kremleva L. V., Myuller O. D., Gerts E. F., Chemshikova Yu. M., Teterevleva E. V., Knyazev A. V.* Method of variational calculation of influence of the propulsion plants of forestry machines upon the frozen and

thawing soil grounds // International Journal of Advanced Science and Technology. 2019. Т. 28, No. 9. С. 179—197.

26. Рудов С. Е., Шати́ро В. Я., Григорьев И. В., Куницкая О. А., Григорьева О. И. Математическое моделирование процесса уплотнения мёрзлого почвогрунта под воздействием лесных машин и трелёвочных систем // Системы. Методы. Технологии. 2018. № 3 (39). С. 73—78. DOI: 10.18324/2077-5415-2018-3-73-78.

References

1. *Burmistrova O. N., Yu. M. Chemshikova, Grigorev I. V., Kunitskaya O. A., Tambi A. A. Tambi.* Theoretical substantiation of parameters of the medium-range engine of a tracked all-terrain vehicle // Systems. Methods. Technologies. 2019. No. 2 (42). P. 81—88. DOI: 10.18324/2077-5415-2019-3-81-88. (In Russ.)
2. *Dobretsov R. Yu., Grigorev I. V., Rudov S. E., Teterevleva E. V., Chemshikova Yu. M.* Increased mobility of tracked and wheeled vehicles // Repair. Recovery. Modernization. 2019. No. 11. P. 4—10. DOI: 10.31044/1684-2561-2019-0-11-4-10. (In Russ.)
3. *Grigorev I. V., Rudov S. E.* Features of operation of wheeled forest machines in complex soil-ground and relief conditions // In the collection: Forest Engineering materials of scientific and practical conference with international participation. Yakutsk, 2018. P. 67—71. (In Russ.)
4. *Ageikin Ya. S.* Passability of cars. Moscow: Mechanical engineering, 1981. 232 s. (In Russ.)
5. *Saarilahti M.* Development of a protocol for ecoefficient wood harvesting on sensitive sites (Ecowood). Soil interaction model. Helsinki: University of Helsinki, Department of Forest Resource Management, 2002. 39 p.
6. *Grigorev I. V.* Reducing the negative impact on the soil of wheeled skidding tractors by justifying their movement modes and technological equipment. Saint Petersburg: Saint Petersburg forestry Academy, 2006. 235 p. (In Russ.)
7. *Bartenev I. M., Drapalyuk M. V.* Reduction of harmful effects of forest tractors and cutting machines on soil and plantings // Forest Engineering journal. 2012. No. 1 (5). P. 61—66. (In Russ.)
8. *Gerasimov Yu. Yu., Syunev V. S.* Ecological optimization of technological machines for logging. Joensuu: Joensuu University, 1998. 178 p. (In Russ.)
9. *Chahina A. M.* Methods to predict and improve cross-wheeled forest machines: Diss. ... doct. techn. sciences'. Arkhangelsk: WITH (A)FU, 2018. 318 p. (In Russ.)
10. *Larin V. V.* Methods of predicting the reference passability of multi-axis wheeled vehicles on the ground: Diss. ... doct. techn. science. Moscow, 2007. 530 p. (In Russ.)
11. *Peskov V. B.* Improvement of models for estimation of ruts and compaction of soils under the influence of movers of wheeled forest machines. The author's abstract diss. ... cand. techn. sciences'. Arkhangelsk: S (A)FU, 2018. 20 s. (In Russ.)
12. *Zolotarevskaya D. I.* Regularities of dynamic deformation of soils under cyclic loads // Pedology. 2005. No. 5. P. 565—574. (In Russ.)
13. *Zolotarevskaya D. I.* Change of rheological properties and density of sod-podzolic soil under dynamic loads // Pedology. 2010. No. 3. P. 313—323. (In Russ.)
14. *Zolotarevskaya D. I.* Changing the rheological properties and density of sod-podzolic sandy loam soil under the influence of a wheeled tractor // Pedology. 2013. No. 7. P. 829. (In Russ.)
15. *Zolotarevskaya D. I.* Research and calculation of soil compaction at work and after stopping the wheel tractor // Tractors and agricultural machines. 2016. No. 8. P. 33—38. (In Russ.)
16. *Ivanov V. A., Khakhina A. M., Ustinov V. V., Korotkov R. K.* Refined dependences for calculating the shear deformation of forest soil in terms of slip and contact spot parameters // Systems. Methods. Technologies. 2015. No. 4 (28). P. 116—120. (In Russ.)

17. Rudov S. E., Shapiro V. Ya., Grigorev I. V., Kunitskaya O. A., Grigoreva O. I. Features of contact interaction of the skidding system with frozen soil // News of higher educational institutions. Forest magazine. 2019. No. 1 (367). P. 106—119. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.1.106. (In Russ.)
18. Rudov S. E., Shapiro V. Ya., Grigorev I. V., Kunitskaya O. A., Grigoreva O. I. Study of the process of destruction of marslike thawing of soils under the influence skidding system // News of higher educational institutions. Forest magazine. 2020. No. 2 (374). P. 101—117. DOI: 10.37482 / 0536-1036-2020-2-101-117. (In Russ.)
19. Rudov S. E., Shapiro V. Ya., Grigorev I. V., Kunitskaya O. A., Grigoreva O. I. Justification of the initial requirements of the mathematical model of interaction of wheeled forest machines with frozen and thawing soil // Systems. Methods. Technologies. 2020. No. 1 (45). P. 72—79. DOI: 10.18324 / 2077-5415-2020-1-72-79. (In Russ.)
20. Rudov S. E., Shapiro V. Ya., Grigorev I. V., Kunitskaya O. A., Grigoreva O. I. Variational method for calculating parameters of interaction between a skidding system and an array of frozen and thawing soils // Systems. Methods. Technologies. 2019. No. 1 (41). P. 68—77. DOI: 10.18324/2077-5415-2019-1-68-77. (In Russ.)
21. Rudov S. E., Shapiro V. Ya., Grigorev I. V., Kunitskaya O. A., Grigoreva O. I. Evaluation of the bearing capacity of frozen and thawed soil with incomplete information about the state of its interaction with the skidding system // Systems. Methods. Technologies. 2019. No. 2 (42). P. 80—86. DOI: 10.18324 / 2077-5415-2019-2-80-86. (In Russ.)
22. Rudov S. E., Grigorev I. V., Kunitskaya O. A., Druzyanova V. P., Pekhutov A. S., Ivanov A. P., Ivanov A. K., Okhlopkova M. K., Pankov V. Yu., Borovikov R. G. Specific features of accounting of state of the massive of the frozen soil grounds under cyclic loads // Bulgarian Journal of Agricultural Science. 2019. T. 25, No. S2. C. 191—205.
23. Rudov S. E., Shapiro V. Ya., Grigorev I. V., Kunitskaya O. A., Grigoriev M. F., Puchnin A. N. Features of accounting for the state of the frozen soil massif during cyclic interaction with the skidding system // Lesotechnicheskiy Zhurnal. 2019. Vol. 9, No. 1 (33). P. 116—128. DOI: 10.12737/article_5c92016f49c838.40242030. (In Russ.)
24. Rudov S., Shapiro V., Grigorev I., Kunitskaya O., Druzyanova V., Kokieva G., Filatov A., Sleptsova M., Bondarenko A., Radnaed D. Specific features of influence of propulsion plants of the wheel-tyre tractors upon the cryomorphic soils, soils, and soil grounds // International Journal of Civil Engineering and Technology. 2019. T. 10, No. 1. P. 2052—2071.
25. Rudov S. E., Grigorev I. V., Kunitskaya O. A., Ivanov N. A., Kremleva L. V., Myuller O. D., Gerts E. F., Chemshikova Yu. M., Teterleva E. V., Knyazev A. V. Method of variational calculation of influence of the propulsion plants of forestry machines upon the frozen and thawing soil grounds // International Journal of Advanced Science and Technology. 2019. T. 28, No. 9. C. 179—197.
26. Rudov S. E., Shapiro V. Ya., Grigorev I. V., Kunitskaya O. A., Grigoreva O. I. Mathematical modeling of the process of compaction of frozen soil under the influence of forest machines and skidding systems // Systems. Methods. Technologies. 2018. No. 3 (39). P. 73—78. DOI: 10.18324 / 2077-5415-2018-3-73-78. (In Russ.)